EXPERIMENTE UND KYBERNETISCHE MODELLVORSTELLUNGEN ZUR LATERALEN SUMMATION BEI DER FARBWAHRNEHMUNG

Bernd Lorbeer

1979

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547005_0023

EXPERIMENTE UND KYBERNETISCHE MODELL-VORSTELLUNGEN ZUR LATERALEN SUMMATION BEI DER FARBWAHRNEHMUNG

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der
Fakultät für Physik
der
Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Bernd Lorbeer
aus Bad Reichenhall - Karlstein

München 1978

Berichterstatter: 1. Prof. Dr. R. Röhler

2. Prof. Dr. P. Wellmann

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 1979

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

DISSERTATIONS– UND FOTODRUCK FRANK
8 München 2, Gabelsbergerstraße 15, Tel. 2 8 0 9 0 9 0

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

A	1.	Einleitung	7
B	2.	Versuchsaufbau und Auswertung	11
	2.1	Testfeld	11
	2.2	Apparatur	14
	2.3	Filter und Farben	17
	2.4	Justierung der Apparatur	19
	2.5	Meßvorgang	20
	2.6	Datenaufnahme und Auswertung	22
	2.7	Kalibrierung	23
	2.8	Auswirkungen unterschiedlicher Unterschwelligkeit und die Vorzüge einer normierten Darstellung	24
	2.9	Versuchspersonen	26
	2.10	Empfindlichkeit der Methode	26
	2.11	Vergleich der Einfachwahlmethode mit dem Einstellverfahren	27
	2.12	Statistische Tests	28
	3.	Meßergebnisse	31
	3.1	Feldgrößeneffekte	31
	3.2	Korrektur der Induktionsleuchtdichte	35
	3.3	Induktionsfarbe und Summationsweite	36
	3.4	Unbunter Kantendetektor	42
	4.	Diskussion der Ergebnisse	43
	4.1	Feldgrößeneffekte	43
	4.2	Korrektur der Induktionsleuchtdichte	44
	4.3	Summationsweite und Induktionswellenlänge	45
	4.4	Unbunter Kantendetektor und Machstreifen	46

C	5.	Modellbetrachtungen zu den experimentell gewonnenen Ergebnissen	48
	5.1	Definition des Farbkantendetektors	48
	5.2	Die Ergebnisse der unterschwelligen Summation im Lichte der Fouriermethode	49
	5.3	Die Daten im Lichte eines Rezeptiven-Feld-Modelles	59
	5.4	Wie die Farbkantendetektion modellmäßig beschrieben werden kann	70
D	6.	Ableitung eines neuronalen Zonenmodells des Farbensehens, das die örtliche Verteilung der Farbmuster berücksichtigt	79
	6.1	Bemerkungen zur Ableitung der Gleichungen	82
	6.2	Ableitung der Gleichungen	85
	6.3	Numerische Lösung des partiellen Integrodifferentialgleichungssystems	90
	6.4	Beispiele für den Sonderfall des dichromatischen Sehens	92
E	7.	Farbmustermetrik: Ein neues Linienelement, welches die örtliche Verteilung der Farben bewertet	95
	7.1	Ableitung des Farbmusterlinienelementes	98
	7.2	Eine Anwendung der Farbmustermetrik	103
	7.3	Erweiterung des Farbmusterlinienelements durch Wichtung der Summationsgebiete	105
	7.4	Die Anwendung der erweiterten Farbmustermetrik im Sonderfall konstanter Wichtungskurven innerhalb der Farbkanäle auf sinus- oder cosinusförmige Rot-, Grün-Muster	107

	7.5	Ein Grenzfall des Farbmuster-linienelementes	111
	7.6	Ein weiteres Beispiel für eine besonders einfache Wichtungs-funktion	113
	7.7	Bemerkungen zu diesem Abschnitt	115
F	8.	"Katastrophentheorie" und Farbmuster-erkennung	116
G	9.	Zusammenfassung	118
H	10.	Literaturverzeichnis	121
I	11.	Anhänge	132
	11.1	Anhang I	132
	11.2	Anhang II	133
	11.3	Anhang III	137
	11.4	Fortran-Computerprogramme	141

1. EINLEITUNG

Probleme der Mustererkennung erschöpfen sich keineswegs im automatischen Lesen von Postleitzahlen. Vielfach finden die Vorgänge der Mustererkennung sowohl in der belebten als auch in der unbelebten Natur Anwendung.

Genauere Kenntnisse der Prinzipien der Mustererkennung wären deshalb wünschenswert. So gewinnt man Satellitenaufnahmen meist noch durch punktweise Abtastung photographischer Bilder. Explorationen auf dem Gebiet der Geologie, Agrarwirtschaft und Meteorologie wären wirkungsvoller, würde man bereits "vor Ort" Vorverarbeitungsmethoden, wie sie im visuellen System z. B. der Primaten ausgeprägt sind, anwenden können. Es besteht demnach eine Herausforderung, mittels mathematischer und physikalischer Methoden die Prinzipien der Mustererkennung herauszuarbeiten. Auch in der Histologie würde man dann das automatische Erkennen der mit pathologischen Vorgängen verknüpften morphologischen Veränderungen mit Erfolg einsetzen können.

Die Bedeutung der Mustererkennung innerhalb der belebten Natur sei am Beispiel der Immunologie erläutert. In der immunologischen Krebstherapie ist das Erkennen von Antigenstrukturen in und auf Zellmembranen erwünscht (Klein, 1966 sowie Möller und Möller, 1967). Andererseits werden Organtransplantationen erst dann auf Dauer erfolgreich sein, wenn die Strukturen der Histokompatibilitätsantigene nicht detektiert werden (Breenbaum, 1967 und Cunningham, 1977).

Es gibt im wesentlichen drei Gründe, warum man zum Studium der Mustererkennung erfolgreich das visuelle System der Vertebraten heranzieht.

Zum einen nämlich ist das visuelle System den neurophysiologischen Arbeitsmethoden relativ einfach zugänglich. Beim Menschen jedoch werden im allgemeinen keine Direktableitungen visueller Sinneszellen aufgezeichnet. Dafür eignen sich aber gerade beim Menschen Methoden der Psychophysik. Mit psychophysikalischen Methoden lassen sich die Vorgänge gerade beim Erkennen komplexerer Muster noch am leichtesten entschlüsseln.

Zweitens erweist sich das visuelle System in mancher Hinsicht als Paradigma für die Prinzipien der sensorischen Datenverarbeitung.

Drittens besteht auf Grund der Evolution vom Einzeller zum Vielzeller und der Kenntnis der Mustererkennung im visuellen System evtl. die Möglichkeit, Rückschlüsse auf die Vorgänge zellulärer Mustererkennnungen zu ziehen. Damit wäre aber z. B. die Verbindung zur Immunologie hergestellt.

Die experimentellen (psychophysischen) Untersuchungen in dieser Arbeit dienten dazu, die Vorgänge bei der Detektion einfacher Farbmuster, wie Farbkanten zu entschlüsseln. Dazu wurde erstmals die Methode der unterschwelligen Summation auf die Farbkanäle ausgedehnt.

Hierbei wird dem Testfeld ein unterschwelliges Farbmuster überlagert und der Einfluß auf den Kantenabgleich in Abhängigkeit u.a. von dem Abstand Induktionsreiz - Kante untersucht.

Weitere Parameter waren bei den Untersuchungen Feldgröße, Testfeldfarbe, Induktionsfarbe und Kompensation der Helligkeitsanteile der Induktionsmuster. Der unterschwellige Reiz führt dabei zu einer signifikant verschiedenen Einstellung des ganzen Testhalbfeldes und wird deshalb als "Induktionsreiz" bezeichnet werden.

Mit der Methode der unterschwelligen Summation werden auch eventuelle orientierungsspezifische Nacheffekte ausgeschaltet, wie sie beispielsweise von Mc Collough (1965), Mai (1972), Lovegrove und Over (1973), Lovegrove (1977) und White (1977) beschrieben wurden.

Die Ergebnisse werden modellmäßig zunächst mit Methoden der linearen Systemtheorie beschrieben.

Aus der Anwendung der Fouriertechnik folgen wichtige Ergebnisse über die Modulationsübertragungsfunktion des Systems. Es ergeben sich dabei u.a. klare Unterschiede zur Detektion von Helligkeitskanten.

Die Methoden der Rezeptiven-Feld-Theorie (im Zweikanalmodell) beschreiben die experimentellen Befunde relativ gut. Nur beobachtet man im Experiment nicht so gut sigmoid ausgeprägte Antwortkurven.

Aus dem Bemühen, die Antwortkurven des Rezeptiven-Feld-Modelles noch vollständiger an die experimentellen Ergebnisse anzupassen, erwächst ein allgemeines nichtlineares System. Dieses System postuliert die Wahrscheinlichkeitssummation als mathematisches Konzept für die Informationsverarbeitung zwischen neuronalen Schichten.

Dieses Modell wird durch die Experimente bestätigt.

Ein weiterer mathematischer Ansatz zur Beschreibung der Farbmusterdetektion wurde unternommen. Dabei werden Methoden der nichtlinearen Netzwerktheorie auf den dreidimensionalen Fall des Farbensehens erweitert. Für zwei einfache Beispiele wird das nichtlineare und partielle Integrodifferentialgleichungssystem gelöst.

Schließlich wird ein neues Linienelement postuliert, welches erstmals die örtliche Verteilung der Farbmuster berücksichtigt. Einfache Beispiele zeigen, daß mit diesem Ansatz und der Variationsrechnung Prinzipien der Musterverarbeitung entwickelt werden können. Als eine Folgerung ergibt sich, daß die Modulationsübertragungsfunktion für reine Farbgitter Tiefpaßcharakter hat.

Abschließend soll gezeigt werden, daß die Vorgänge bei der Musterdetektion künftig wohl auch mit Methoden der "Katastrophentheorie" erforschbar sind.

2. VERSUCHSAUFBAU UND AUSWERTUNG

Um Prinzipien der Erkennung und Verarbeitung von Farbmustern mit Hilfe der unterschwelligen Summation zu untersuchen, eignen sich einfache und wohldefinierte Farbmuster. Wegen der großen Bedeutung von Kanten bei der technischen Detektion (Hueckel, 1971) und der neurophysiologischen Analyse (Hubel und Wiesel, 1960) des visuellen Systems soll auch bei diesen Farbexperimenten der Vorgang bei Kantendetektionen untersucht werden. Um bei den folgenden Versuchen den Beitrag der einzelnen Musterkomponenten zur Farbkantendetektion zu prüfen, sollen diese in sich homogen, also räumlich unstrukturiert, andererseits aber scharf abgegrenzt sein.

2.1 TESTFELD

Die Testfelder bei diesen Versuchen waren entweder quadratisch begrenzt und von 2° und 5° Kantenlänge (Abb. 1) oder rechteckige Felder der Ausdehnung 15° x 7,5° bzw. 10° x 5°. Alle Felder hatten ein dunkles Umfeld, und waren in der Mitte durch eine feine, kaum wahrnehmbare dunkle Trennkarte geteilt. Durch vorsichtige Defokussierung konnte diese Kante ganz zum Verschwinden gebracht werden. Beide Feldhälften konnten bezüglich Farbe und Helligkeit abgeglichen werden. Die eine Hälfte wurde nicht verändert und diente als Referenzfeld. Der anderen Feldhälfte wurden in bestimmten Abständen von der Trennkarte balken- oder halbfeldförmige unterschwellige Reize überlagert. Diese Feldhälfte - bisweilen auch als Einstellfeld bezeichnet - wurde durch Einstellen des Farbmischverhältnisses gegen das Referenzfeld abgeglichen.

Fixationsmarken waren nicht angebracht, da die Versuchspersonen die beiden Feldhälften frei und ohne zeitliche Begrenzung abgleichen sollten.

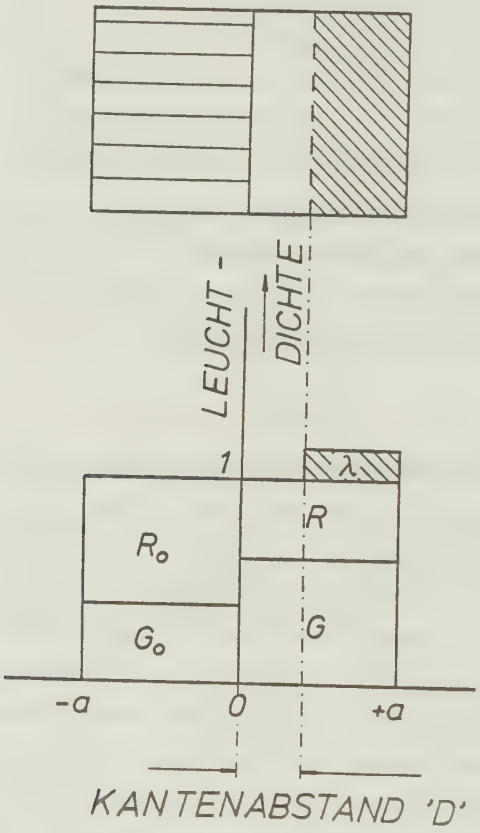


Abb 1 Testfeld. Zur Farberzeugung werden nur zwei Filter verwendet. Im Referenzfeld werden die durch diese Filter erzeugten nicht-spektralen Primärfarben mit einem konstanten Mischungsverhältnis (R_o, G_o), im Einstellfeld mit einem veränderbaren Mischungsverhältnis (R,G) dargeboten. Mit λ ist das dem Einstellfeld überlagerte monochromatische Induktionsfeld bezeichnet. Die durch das Induktionsfeld erzeugte Helligkeitskante konnte durch ein unbuntes Kompensationsfeld ausgeglichen werden. Natürlich werden auch bei dieser Filterwahl alle drei (meist ebenfalls mit R,G,B bezeichneten) Farbrezeptormechanismen angeregt.

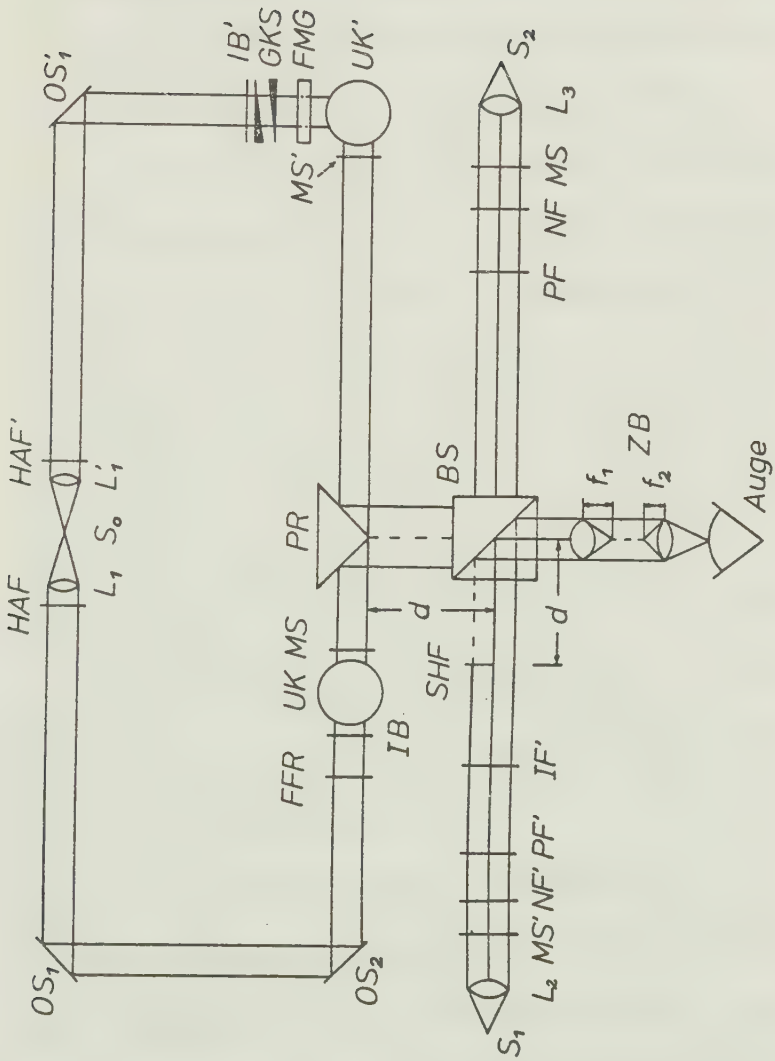


Abb. 2 Versuchsanordnung zur experimentellen Untersuchung der Farbkantendetektion mit Hilfe der unterschwelligen Summation.

2.2 APPARATUR

Figur 2 zeigt schematisch ein einfaches optisches System, mit dem die Testfeldanordnung aus Abb. 1 erzeugt wird.

Dabei bilden die Strahlengänge von S_o bis PR die in Figur 1 mit R,G bzw. R_o, G_o bezeichneten Grundfelder. Durch den Strahlengang S_1 bis BS überlagert man dem Grundfeld die induktiven und unterschwelligen Reize. Der Strahlengang S_2 bis BS dient dazu, den monochromatischen Grundreiz bezüglich seines Helligkeitsanteils zu kompensieren.

Als Lichtquelle S_o diente eine Halogenlampe (200 W, max. 6,6 A) der Normlichtart A)*. Versorgt wurde die Lichtquelle S_o über einen Stromkonstanter (zentro-electronic), um Helligkeitsschwankungen in beiden Strahlengängen zu vermeiden. Das Licht von S_o wurde durch die Linsen L_1 bzw. L_1' kollimiert, bevor es die Lampe durch die Hitzeabsorptionsfilter HAF bzw. HAF' verließ. Nach Reflektion an Oberflächenspiegeln OS_1 und OS_2 trat das linke Lichtbündel durch zwei aneinandergrenzende Anlauffiltergläser (Schott, Mainz) und eine Irisblende (IB) in die Ulbrichtkugel (UK). Die Filtergläser waren in einem Filterhalter (FFR) befestigt, welcher sich auf einem Verschiebereiter mit Feintrieb auf der optischen Bank befand. Durch Drehen des Verschiebereiters senkrecht zum Strahlengang gelangen unterschiedliche Flächenanteile der Farbfiltergläser zur additiven Mischung in die Ulbrichtkugel. So konnte in diesem Strahlengang eine feste, jedoch reproduzierbare Referenzfarbe erzeugt werden. Durch die Irisblende (IB) wurden die infolge der chromatischen Aberration der Linse L_1 leicht gelb

)* Die Normlichtart A ist eine Lichtart, deren relative spektrale Energieverteilung der eines Planckschen Strahlers bei einer Temperatur von 2854 °K entspricht.

erscheinenden Randstrahlen ausgeblendet. Der aus der Ulbrichtkugel austretende Lichtstrahl schließlich wurde von einem oberflächenverspiegelten Prisma (PR) reflektiert und durch ein 8 x Keplerfernrohr mit Ramsdenokular durch den Strahlenteilerwürfel (BS) hindurch beobachtet. Vor dem Fernrohr war eine Beißstütze angebracht, um die Kopfstellung während des Versuches konstant zu halten. In die beiden Strahlengänge waren vor dem Biprisma Mattscheiben angebracht, um ohne Maxwell-Anordnung räumlich vollständig unstrukturierte Grundfelder zu erzeugen. Das rechte Strahlenbündel trat nach Reflektion an dem Oberflächenspiegel (OS_1') durch die Irisblende (IB'). Damit wurden störende Randstrahlen ausgeblendet und grob die Helligkeit des linken Referenzstrahles eingestellt. Den feinen Helligkeitsabgleich der beiden Strahlenbündel erzielt man in dem folgenden Graukeilsystem (GKS). Dieses bestand aus zwei je 10 - log - Einheiten umfassenden "Neutralkeilen", deren Schwärzungskurven gegensinnig verliefen. Eventuell auftretende Leuchtdichtegradienten des Strahlenbündels senkrecht zur optischen Achse des Systems waren für die Farbnachmischung in der Farbmischapparatur ohne Bedeutung, da dann immer noch jedes beliebige Mischverhältnis der beiden Farbfiltergläser in der Farbmischapparatur hergestellt werden konnte.

Die auf das Graukeilsystem folgende Farbmischapparatur (FMG) arbeitet nach dem Prinzip von Burnham (1952) und ist ausführlich beschrieben in Rentschler (1971). In der Farbmischapparatur befinden sich die gleichen Filtergläser, wie sie zur Erzeugung des Referenzstrahles in (FFR) verwendet wurden. Deshalb besitzen die beiden zu vergleichenden Halbfelder eine weitgehend identische spektrale Verteilung. Da man zur Herstellung des Farbortes jeweils zwei der vorhandenen Farbfiltergläser kombinierte, genügt es

zum jeweiligen Nachmischen der Farbe im Farbmischgerät (FMG) einen Schrittmotor (Phytron, 200 Schritte pro Umdrehung) senkrecht zur optischen Achse des Systems zu betreiben. So konnten die Mischungsverhältnisse der auf die 17,5 x 17,5 mm großen Maske aufgebrachten nebeneinander liegenden Farbfiltergläser mit genügender Genauigkeit gewählt werden. Die an die Farbmischapparatur (FMG) anschließende Ulbrichtkugel (UK') wurde ebenso wie die Ulbrichtkugel (UK) mit Diwagolanfarbe (zur Erzeugung eines normierten Weißtones) ausgemalt.

Die Überlagerung des Induktionsfeldes und des Kompensationsfeldes erfolgt in den Strahlengängen (S_1) bis (BS) und (S_2) bis (BS). Das Licht der über einen Spannungskonstanter gespeisten Quelle (S_1) wird durch die Linse (L_2) kollimiert und geht dann durch eine Mattscheibe (MS')), um Beugungserscheinungen an der Spiegelhalbfeldkante durch kohärente Beleuchtung zu vermeiden. Auch erscheint infolge der Mattscheibe das Induktionsfeld räumlich unstrukturiert. Zum groben Helligkeitsabgleich diente ein neutrales Graufilter (NF'), der feine Helligkeitsabgleich erfolgte mit einem Polarisationsfilter (PF'). Nach dem Polarisationsfilter wird je nach den Untersuchungsbedingungen ein enges Interferenzfilter (IF') gewünschter Wellenlänge in den Strahlengang gebracht. Zur Erzeugung des Induktionsfeldes wird eine Glasplatte (SHF), die ein mit einer scharfen Kante versehenes oberflächen-verspiegeltes Halbfeld aufweist, auf einem Feinkreuztrieb befestigt. Durch Verschieben von (SHF) entlang der optischen Achse des Strahlengangs bringt man die Kante über einen Strahlenteilerwürfel in die Beobachtungsebene der Prismenkante (PR). Verstellen des Feintriebes senkrecht zur optischen

Achse des Strahlengangs gestattet es, dem Testfeld monochromatische Halbfelder variabler Ausdehnung zu überlagern.

Zur Erzeugung unterschwelliger Balkenmuster ersetzt man (SHF) einfach durch Spaltblenden.

Der Strahlengang, der von der Lichtquelle (S_2) ausgeht, wird durch (L_3) kollimiert und passiert Mattscheibe (MS), neutrales Graufilter (NF) und Polarisationsfilter (PF). Durch Nachstellen von (PF) kann man die Helligkeit des durch (BS) tretenden und an (SHF) reflektierten Strahles korrigieren und so die vom Induktionsfeld hervorgerufene Helligkeitskante kompensieren. Diesen Abgleich nimmt die VP nach Dunkeladaptation aber vor dem Beginn der eigentlichen Messung vor (vgl. Abschnitt 2.5).

Die Größe und Form der Beobachtungsfelder werden bestimmt durch Blenden, die man in die Zwischenbildebene des Fernrohres einbrachte.

2.3 FILTER UND FARBEN

Die Glasfilter (Schott, Mainz)

RG 610/2	x = 0,702	y = 0,298	}	x,y sind die sog. CIE-Koordinaten bei Normlichtart A
OG 590/1	x = 0,662	y = 0,338		
VG 9/2.53	x = 0,276	y = 0,618		
BG 28/1	X = 0,214	y = 0,306		

waren so gewählt, daß sie erstens einen ziemlich großen Bereich im Farbdreieck umfassten (Abb.3) und zum anderen die gleiche Hellempfindung hervorriefen. Dabei konnte festgestellt werden, daß bei unseren Messungen das Abney'sche Additivitätsgesetz der Helligkeiten weitgehend erfüllt war (vgl. Guth (1969)), daß also auch die Mischungsverhältnisse in der Farbmischapparatur subjektiv von gleicher Helligkeit waren.

Da die Glasfilter weiterhin genügend homogen waren, erübrigte sich eine nachträgliche Helligkeitskorrektur während der Messungen.

Die Kalibrierung wird in Abschnitt 2.7 beschrieben.

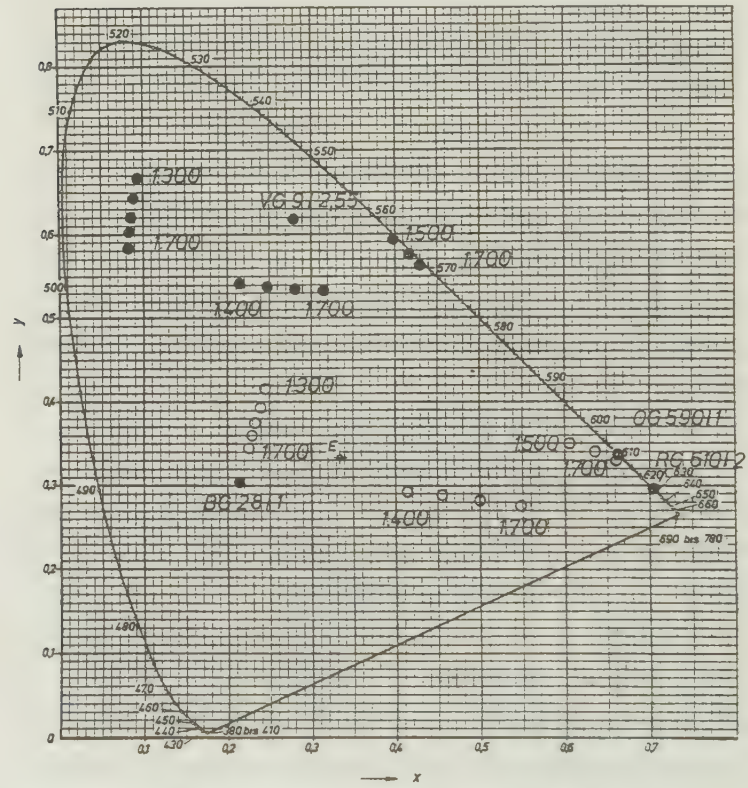


Abb. 3 Eingetragen sind die Farborte RG,OG,VG und BG der in (2.3) angegebenen Farbfiltergläser. Die ausgefüllten Kreissymbole geben die mit dem Pritchard-Photometer gemessenen, die unausgefüllten Kreissymbole die mittels der Korrekturformel bestimmten Farborte des bei den Versuchen verwendeten Meßbereiches an. Hier sind nur die jeweils 100 Einheiten des Digitalvoltmeters voneinander entfernten Meßpunkte angegeben. Diese liegen gut äquidistant auf einer Geraden.

2.4 JUSTIERUNG DER APPARATUR

Nachdem die Prismenkante durch Verschieben des Fernrohres scharf eingestellt ist, wird durch Betätigung des Feinkreuztriebes in Richtung des Strahlenganges (S_1) bis (BS) die Spiegelfeldkante (SHF) mittels (BS) in die Ebene der Prismenkante abgebildet.

Der Vortrieb in Längeneinheiten des Feinkreuztriebes senkrecht zum Strahlengang (S_1) bis (BS) wird in Minuten Gesichtsfeldwinkel umgerechnet, so daß der Abstand der Induktionsfeldkante also in Minuten angegeben wird. Die Nullpunkteinstellung, d.h. das Zusammenfallen der Prismenkante (PR) mit der Halbfeldspiegelkante (SHF), wurde vor jeder Meßreihe vom Versuchsleiter überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

Beim Abgleich der Helligkeit der beiden Kanäle von (S_o) bis (PR) wurde zunächst durch Begrenzung der Strahlenbündel mittels der Irisblenden (IB) und (IB') darauf geachtet, daß die Weißtöne beider Gesichtsfelder bei gleicher Helligkeit übereinstimmten. Der feine Helligkeitsabgleich erfolgt dann über das Graukeilsystem (GKS).

Durch Kombination zweier Farbfiltergläser in dem Farbfilterhalter (FFR) wurde der Farbort des Vergleichsfeldes festgelegt. Diese Farbe wird auch Referenzfarbe genannt. Den Abgleich des Nachstellfeldes muß jede VP selber vornehmen, nachdem die Farbmischapparatur (FMG) gleiche Farbfilterkombination wie der Farbfilterrahmen in (FFR) erhielt.

2.5 MEßVORGANG

Hat der Versuchsleiter den feinen Helligkeits- und groben Farbabgleich der beiden Testfelder vorgenommen, läuft das übliche Meßprogramm ab.

Bei vorgegebener Position des Polarisationsfilters stellt die Versuchsperson den die Lichtquelle (S_1) versorgenden Spannungskonstanter so ein, daß die durch Macheffekt hell erscheinende Induktionsfeldkante eben verschwindet. Dieser Spannungswert wird dann zu Beginn aller Messungen mit dieser Filterkombination eingestellt. Da die Farbe des Induktionsfeldes durch ein Interferenzfilter erzeugt wird, verändert der Farbton der Lichtquelle natürlich nicht den Farbton des Induktionsfeldes. Nach längerer Beobachtung wird meist infolge der Adaptation die Induktionsfeldkante wieder sichtbar. Durch Nachstellen des Polarisationsfilters (PF') reduziert die VP die Intensität des Induktionsfeldes soweit, daß die Kante auch bei Bewegung derselben unsichtbar bleibt. Nun wurde die Intensität durch den Versuchsleiter nochmals um mindestens eine 5^{o} - Drehung des Polarisationsfilters (PF') vermindert. Dieser Wert wird 5^{o} - Unterschwelligkeit genannt und während der Messung beibehalten.

Durch Abdecken des Prismas (PR) war nur noch das Induktionsfeld zu sehen. Bei eingeschalteter Lichtquelle (S_2) hatte die Versuchsperson dann die Aufgabe, durch Regeln des Polarisationsfilters (PF) die Helligkeit dieses Kompensationsfeldes nach der Distinct-Border-Methode auf die Helligkeit des Induktionsfeldes einzustellen. Dieser Abgleich erfolgte mühelos, da das Induktionsfeld bei der geringen Leuchtdichte beinahe

unbunt erschien. Auch dieser Wert des Polarisationsfilters (PF) wurde während der Messung und bei Wiederholung derselben beibehalten.

Während sich die VP von diesem Einstellvorgang im weiterhin verdunkelten Raum erholte, stellte der Versuchsleiter durch Abdecken des Einstellfeldes hinter (HAF) die Induktionsfeldkante auf die Prismenkante ein. Von dieser Position aus wurde dann ein Ausgangswert eingestellt. War dies geschehen, hatte die Versuchsperson mit den Messungen zu beginnen. Für zunächst zunehmende, dann abnehmende Abstände der Induktionskante oder in umgekehrter Reihenfolge hatten die VP's das Testfeld auf Gleichheit einzustellen. Diese Werte wurden festgehalten (vgl. 2.6). War der Abgleich bei einer Position der Induktionsfeldkante mehrmals erfolgt, wurden Kontrollmessungen ohne Induktionsfeld (durch Unterbrechen des Strahlengangs) zwischen (SHF) und (BS) ausgeführt. Es wurden für Kontrollmessungen mindestens fünf und für Induktionsmessungen nie unter zehn Einzeleinstellungen vorgenommen. Da der Abgleich beider Testfeldhälften gut reproduzierbar war, begnügte man sich bei jeder Kantenposition mit etwa 20 Einstellungen auf Gleichheit. Während der Kontrollmessungen stellte der Versuchsleiter eine neue Kantenposition ein. Die Versuchsperson kannte also nie die Position der Induktionskante. Auch wußte sie nicht, ob eben eine Kontrollmessung ausgeführt wurde. Außerdem wurde während der Messung bisweilen die Geschwindigkeit der Schrittmotoren geändert, so daß sich die Versuchspersonen keine Einstellungen merken konnten.

Dafür war für den Abgleich keine zeitliche Begrenzung vorgesehen.

Eine Messreihe dauerte etwa 50 Minuten. Es wurde nie mehr als eine Messreihe pro Tag aufgenommen.

2.6 DATENAUFNAHME UND AUSWERTUNG

Hatte die Versuchsperson das variable Halbfeld nach der Einstellmethode auf das feste Vergleichshalbfeld abgestimmt, benötigte man zur Auswertung der Daten nur die Position des Filterrahmens. Hiermit waren auch die jeweiligen Anteile der Farbfiltergläser an der additiven Farbmischung bestimmt. Insbesondere erübrigten sich zusätzliche Ja- und Nein-Antworten. Da die Farben aus nur zwei Farbfiltern gemischt wurden, genügte es, die Maskenöffnung in nur einer Richtung zu verschieben. Die Orts-Koordinaten der Maskenöffnung wurden über induktive Weggeber in Gleichspannungssignale gewandelt, diese an einem Digitalvoltmeter abgelesen und schließlich an einem Kienzle-Drucker ausgegeben. Da die Kontrollmessungen zeitlich ziemlich konstant blieben, war es gleichgültig, ob man bei der Normierung die Induktionseffekte auf benachbarte Kontrollen oder den Mittelwert aller Kontrollmessungen bezog.

Der maximale Induktionseffekt, der sich beim Zusammenfallen von Induktions- und Prismenkante ergibt, wurde willkürlich gleich zu eins angenommen.

2.7 KALIBRIERUNG

Die Farbort- und Helligkeitsbestimmungen der Testfelder erfolgten mit einem Spectra Pritchard Photometer (Modell 1970 -PR). Der bestehende Zusammenhang zwischen den Koordinaten des Farbfilterrahmens und denen des CIE-Farbraumes in Form einer projektiven Abbildung konnte nicht gemacht werden, da eine projektive Abbildung durch zwei aufeinander abzubildende nicht entartete Vierecke definiert ist. Klarerweise istjedes Viereck (zu einem Zweieck) entartet, wenn man nur mit zwei Filtergläsern Farben mischt. Es wurden zunächst die Farborte der einzelnen Farbfiltergläser (RG 610/2, BG 28/1, VG 9/2.53, OG 590/1) bestimmt, deren Normspektralwerte bei Beleuchtungsart A gegeben waren. Mit den in den Operating Instructions angegebenen Formeln wurden Korrekturfaktoren bestimmt, mit denen man schließlich die Farborte der Mischfarben berechnete.

Jede eingestellte Farbmischung war somit also bestimmt durch die Position des Farbfilterrahmens im Farbmischgerät, welche über Induktionsweggeber am Digitalvoltmeter ablesbar war, und durch die Angabe der Spektralfarbwerte im CIE-Farbdreieck. Bei diesem Verfahren wurde die Änderung der spektralen Lichtzusammensetzung in der Ulbrichtkugel, welche bei sehr weißer und glänzender Innenfarbe durch $\frac{\varrho(\lambda)}{1-\varrho(\lambda)}$ (Richter, 1976) beschrieben wird, vernachlässigt ($\varrho(\lambda)$ spektr. Gang des Kugelreflexionsgrades).

Da die Versuchspersonen durch wiederholtes Hin- und Herbewegen des Farbfilterrahmens (FMG) den Abgleich der beiden Halbfelder bewerkstelligten, konnte auf die Korrektur der toten Gänge (Cullmann, 1973) in der Mechanik der Farbmischapparatur verzichtet werden. In der Abb. 3 sind die mit dem Pritchard

Photometer direkt gemessenen CIE-Normspektralwerte mit ausgefüllten Punkten angegeben. Der Abstand zwischen je zwei Punkten entspricht 100 Einheiten auf dem Digitalvoltmeter. Da die Punkte innerhalb der Meßgenauigkeit des Photometers für jede Filterkombination gut äquidistant sind und gut auf einer Geraden liegen, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den am Digitalvoltmeter abgelesenen Werten und sowohl den x - als auch y - CIE-Koordinaten. Wählt man die normierte Darstellung, so ergeben sich also gleiche Kurven, gleichgültig ob man die am Digitalvoltmeter direkt abgelesenen Werte oder die berechneten CIE-Werte normiert. Ein weiteres Beispiel für einen Vorzug der normierten Darstellung findet man in Abschnitt 2.8.

Die Anwendung der Korrekturformeln ändert an diesem linearen Zusammenhang nichts. Obwohl die Korrekturformeln immer nur für kleine Bereiche im CIE-Farbdreieck gelten, war es nicht notwendig, sie zukzessive nach jedem Meßpunkt neu zu berechnen. Die korrigierten Meßpunkte liegen nämlich auch so gut auf Geraden.

Die Eichpunkte der Filterkombination (RG 610/2 und OG 590/1) liegen so dicht, daß Sie in Abb. 3 nicht eingezeichnet sind.

2.8 AUSWIRKUNGEN UNTERSCHIEDLICHER UNTERSCHWELLIGKEIT UND DIE VORZÜGE EINER NORMIERTEN DARSTELLUNG

Infolge der Normierung wird der Parameter "absolute Größe der Induktion" eliminiert, der Parameter "laterale Wirkung der Induktion" jedoch deutlich hervorgehoben.

Bei einem Testfeld der Größe 10° x 5° und der Filterkombination (RG 610/2 und VG 9/2.53) wurde für eine Unterschwelligkeit von 5° und 11° (PF) der Induktionseinfluß bei bestimmten Abständen von der Trennkarte gemessen. Dabei wurde deutlich, daß die Größe der Farbverschiebung mit der Intensität des monochromatischen Induktionsreizes bei bestimmter räumlicher Anordnung desselben abnimmt. Die normierte Darstellung in Abb. 4 zeigt aber, daß die Breite des Summationsbereiches in den hier dargestellten Grenzen gut unabhängig von dem Grad der Unterschwelligkeit ist.

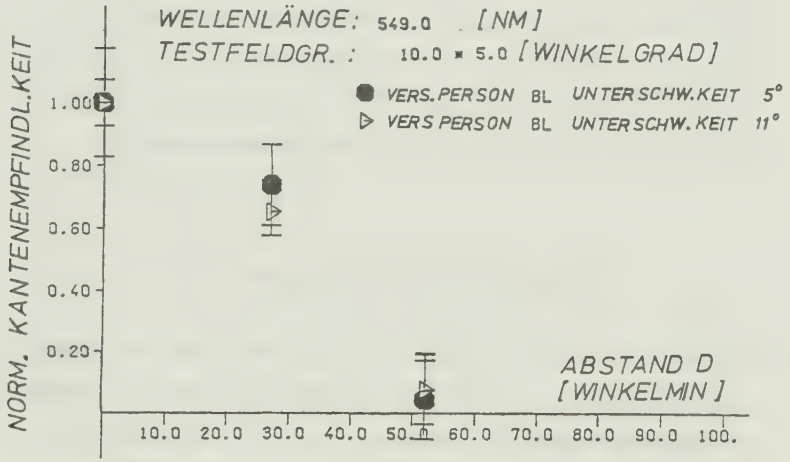


Abb. 4 Der Grad der Unterschwelligkeit ist hier durch die Einstellung (PF) des Polfilters ausgedrückt. Diese Daten liegen im Bereich deutlicher Unterschwelligkeit, wurden also nach nochmaliger Intensitätsverminderung der Decrementschwellenwerte gewonnen.

Bei einer Unterschwelligkeit von 15° gibt es keine Einstellungen mehr, die sich von den Kontrollen signifikant unterscheiden. Obwohl das Kriterium "Verschwinden der Induktionskante" interindividuellen Schwankungen unter-

worfen ist, sind die normiert dargestellten Ergebnisse objektiv. Insbesondere sind also auch die Ergebnisse mehrerer Versuchspersonen miteinander vergleichbar. In den folgenden Darstellungen wurde dann auch dieses normierte Verfahren angewendet.

2.9 VERSUCHSPERSONEN

Drei Versuchspersonen nahmen an den Untersuchungen teil. Diese waren emmetrop und normal farbsichtig, wie ein Test mit Ishihara-Tafeln ergab. Zwei der Beobachter (B.L.), 28 Jahre, und (I.R.), 35 Jahre, wußten über den Zweck der Versuche Bescheid. Die dritte Versuchsperson, (H.W.), 22 Jahre, wurde erst nach Abschluß der Messungen über die zugrunde liegenden Aufgabenstellungen unterrichtet.

2.10 EMPFINDLICHKEIT DER METHODE

Am Beispiel der Versuche am 10° x 5° - Feld und der Filterkombination (VG 9/ 2.53 und RG 610/2) wird hier die Änderung der Farbeinstellung in Einheiten des CIE-Systems angegeben. Bei einer 5° - Unterschwelligkeit wird bei Kontrollmessungen (also bei Messungen ohne Induktionsreiz) der Farbwert (x = 0.275, y = 0.618) eingestellt, bei maximaler Induktion jedoch der Farbwert (x = 0.282 y = 0.615). Die Änderung der Farbeinstellung in CIE-Einheiten beträgt demnach $\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ $= \sqrt{0.007^2 + 0.003^2} \approx 0.0076 \approx 0.008$

Experimentell gewonnene Vergleichsdaten sind bislang nicht vorhanden. Rentschler (1973) hat jedoch Schwellenwerte für das Farbunterscheidungsvermögen in CIE-Einheiten angegeben.

Der Vergleich mit dem 2.5° Feld bei grünem Farbort ergibt, daß die maximale Induzierung (auch bei anderen Versuchsbedingungen) zu Einstellveränderungen führt, welche ungefähr im Bereich der Unterschieds-Schwelle liegen. Dieser Vergleich ist natürlich unvollständig, da andere Versuchsbedingungen (unterschiedliche Beobachtungsfelder, verschiedene Fixation usw.) und verschiedenartige Schwellendefinitionen und Entscheidungskriterien (vgl. Abschnitt 2.9) angewendet wurden.

Auf die Angabe der Farbdifferenz im psycho-physiologischen Farbraum mit Hilfe eines der bekannteren Linienelemente konnte verzichtet werden, da hierzu ebenfalls keine experimentellen Vergleichsdaten vorlagen.

2.11 VERGLEICH DER EINFACHWAHLMETHODE MIT DEM EINSTELLVERFAHREN

Es ist noch zu erklären, warum sowohl die Mittelwerte der Farbverschiebungen infolge der Induktionsreize als auch die mittleren Fehler der Einzelabweichung im Bereich oder auch unter den bei Rentschler (1973) angegebenen Schwellen liegen. Die Schwellen sind dort durch die Standardabweichungen der Einstellungen definiert worden. Die Antwort folgt aus den unterschiedlichen Entscheidungsmodellen. Bei I.R. (1973) hatte die Versuchsperson innerhalb sehr kurzer Zeit auch bei bisweiliger Unsicherheit und bei Fixation eine Antwort zu geben. Die einzelne Antwort der Versuchsperson war also mit einer größeren Unsicherheit versehen. Bei den Versuchen mit der unterschwelligen Summation konnte die Versuchsperson in aller Ruhe den bestmöglichen Abgleich bilden (Decrement-Schwelle) ohne zu fixieren. Versuche mit der Einstellmethode

durchgeführt, dürften also gegenüber Versuchen mit Entscheidungskriterien kleinere Streuungen der Ergebnisse und genauere Einstellungen liefern.

2.12 STATISTISCHE TESTS

Die Objektivität der Messungen soll durch statistische Tests erhärtet werden. Schließlich ist nicht unmittelbar einleuchtend, daß unterschwellige Veränderungen des Testfeldes zu signifikant verschiedenen Einstellungen führen. Die bei der unterschwelligen Summation gewonnenen Versuchsergebnisse wurden untersucht auf Normalverteilung, statistische Signifikanz und Zufälligkeit. Brown und andere zeigten 1956, daß selbst nichtlineare und lokale (kleine Umgebungen von Punkten) Transformationen vom Raum der Primaries in den CIE-Raum (mit den x-, y-Koordinaten) keinen störenden Einfluß auf Wahrscheinlichkeitsberechnungen haben. Deshalb konnten diese Untersuchungen unbedenklich mit den Positionen der Farbfiltermaske angestellt werden.

Durch Randomisierung wurden die in Band 1 der Datensammlung enthaltenen Daten drei Gruppen, entsprechend den drei Tests, zugeordnet.

Da der Test auf Normalverteilung der Versuchsergebnisse noch nicht gemacht war, wurde die Signifikanz unterschiedlicher Einstellung bei Einblenden des Induktionsfeldes mit einem verteilungsunabhängigen Test überprüft. Hierzu eignete sich beispielsweise der Test von Wilcoxon, Mann und Whitney für unabhängige Beobachtungen. Hier und bei den folgenden Tests konnte man sich darauf beschränken, nur die Fälle mit maximaler Induktion im Vergleich zu Kontrollmessungen zu untersuchen. Da die eine der berechneten Testgrößen Null war,

konnte die Hypothese der Signifikanz klarerweise angenommen werden. Die beiden untersuchten Mittelwerte bei Einstellung mit und ohne Induktionsreiz sind also signifikant verschieden. Wir reagieren also signifikant auf den nicht gesehenen Induktionsreiz.

Der Test auf Normalverteilung wurde angestellt, da wir zum Nachmischen des Vergleichsfeldes über nur einen Freiheitsgrad der Filterverschiebung und entsprechend nur über zwei Primaries (zwei Farbfiltergläsern) verfügten. Der Test auf Normalverteilung wurde graphisch mit Wahrscheinlichkeitspapier bestimmt und zeigte gute Normalverteilung der Daten (vgl. Abb. 5). Die Normalverteilung der Daten beweist zusammen mit der Signifikanz, daß wir auf den unterschwelligen Reiz mit n ($n \geq 1$) ganz bestimmten unabhängigen Mechanismen reagieren (Satz über die Summe unabhängiger normalverteilter Zufallsvariabler).

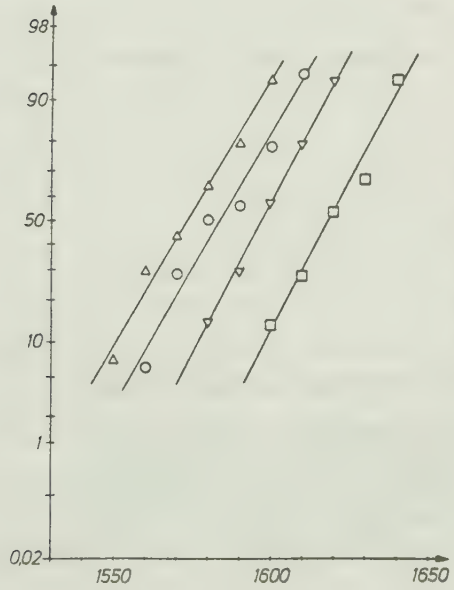


Abb. 5 Graphischer Test auf Normalverteilung der Meßwerte. Die Ordinate gibt die Summenhäufigkeit in Prozent an. An der Abszisse sind nur die am Digitalvoltmeter abgelesenen Zahlenwerte angegeben. Die Einheiten und Dimensionsfaktoren sind für die Versuche natürlich ohne Bedeutung.

Da die Varianzen der untersuchten Meßreihen in etwa gleicher Größe sind, könnte man künftig Methoden der Varianzanalyse anwenden, um bei Versuchen mit unterschwelliger Summation Einflüsse einzelner Versuchsparameter herauszuarbeiten.

Die der dritten Gruppe zugeordneten Meßergebnisse wurden auf dem 5 % - und 1 % - Niveau auf Zufälligkeit (Iterationstest, Kreyszig (1967)) geprüft, um so statistisch die Objektivität der Versuchspersonen bei den Einzeleinstellungen zu erhärten. Die Ergebnisse der Tests zwingen zur Annahme der Hypothese, daß Zufälligkeit der von den Versuchspersonen vorgenommenen Einstellungen vorliegt. Denn bei acht Pluszeichen liegt die Anzahl der Iterationen von acht zwischen den kritischen Werten fünf und zwölf.

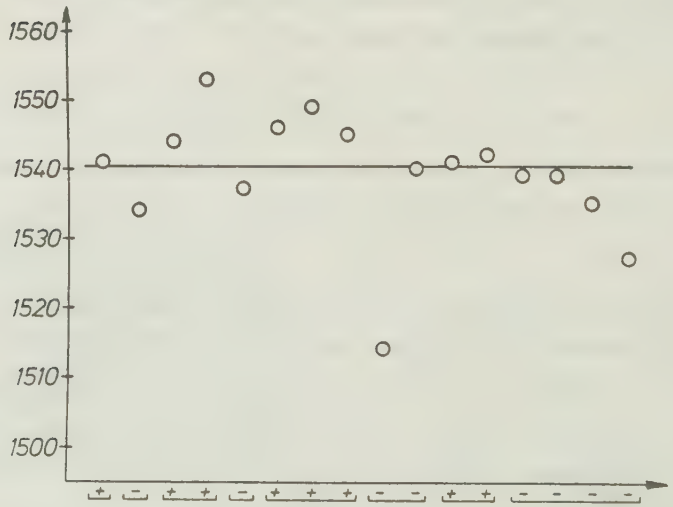


Abb. 6 Hier geben die Zahlenwerte an der Ordinate die am Digitalvoltmeter ablesbaren Werte ohne Einheiten und Dimensionfaktoren wieder. Entsprechend der Reihenfolge ihrer Detektion sind die Meßwerte entlang der Abszisse von links nach rechts aufgetragen. Durch Klammern sind die Iterationen dargestellt.

3. MEßERGEBNISSE

Die folgenden Daten wurden von B.L., I.R. und H.W. als Versuchspersonen (vgl. 2.9) aufgenommen. Es wurde darauf geachtet, daß die Versuchsbedingungen in allen Fällen entsprechend Abschnitt 2 eingehalten wurden.

Es wurde nie mehr als eine Kurve am Tag von einer Versuchsperson aufgestellt. Die Zeichnungen wurden mittels eines FORTRAN - Computerprogrammes gewonnen. Der Übersichtlichkeit und des Zusammenhangs wegen waren nachträglich mehrere Versuche in einer Zeichnung zusammengefaßt worden. Die Interpolationen erfolgten mittels eines Unterprogrammes, welches die Parameter einer vorgegebenen Funktion nach der Methode der kleinsten Quadrate an die Meßpunkte anpaßte, bis eine bestimmbare Konvergenzschranke erreicht war. In manchen Fällen wurden die Interpolationskurven graphisch ausgegeben. Eine Ausnahme hiervon bilden die Interpolationskurven in Abschnitt 3.4, welche einfach durch die Meßpunkte gelegt wurden.

3.1 FELDGRÖßENEFFEKTE

In der Abb. 7 sind die Ergebnisse für verschiedene Feldgrössen unter 5^{o} Ausdehnung dargestellt. Die anderen Versuchsparameter, nämlich Induktionsfarbe (λ = 664 nm) und Beobachter blieben unverändert. Unter gleichen Bedingungen ist der Feldgrößeneffekt unter 5^{o} Ausdehnung der Testfelder ebenfalls bei freien Augenbewegungen also gering.

Dargestellt ist in Abb. 7 auch eine der Meßreihen aus Abb. 11, um zu demonstrieren, daß eine geringe Änderung der Testfeldfarbe keine Veränderung der Summationsweite bewirkt.

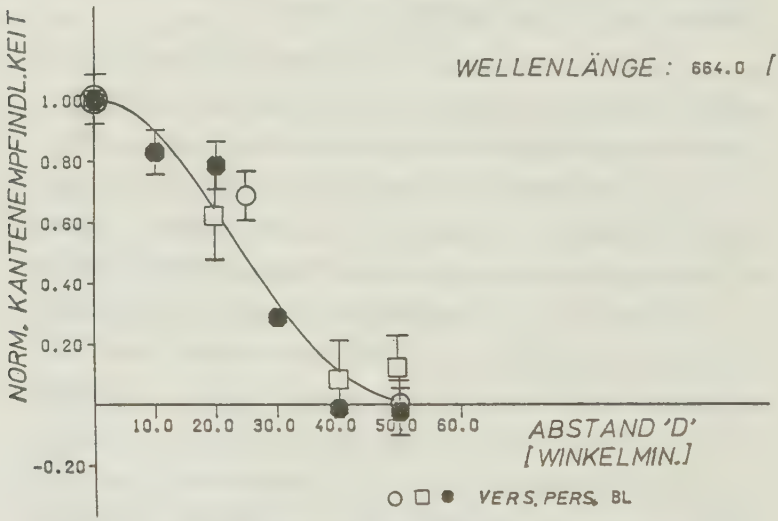


Abb. 7 Die durch Quadrate bzw. Kreise dargestellten Symbole wurden bei der Filterkombination RG/VG und einem Testfeld der Größe 5^{o} x 1.6^{o} bzw. 5^{o} x 5^{o} gewonnen. Die Filterkombination RG/OG und ein 2^{o} x 2^{o} - Testfeld fand bei den ausgefüllten Achtecken Anwendung.

Bei Feldern über 5^{o} Ausdehnung tritt jedoch ein deutlicher Feldgrößeneffekt auf.

Die Daten in Abb. 8 wurden von dem gleichen Beobachter wie in Abb. 7 an einem 15^{o} x 7.5^{o} - Testfeld gewonnen. Dabei wirkt sich die geringfügige Änderung der Induktionsfarbe erwartungsgemäß nicht aus, da $\Delta\lambda$ = 2nm für diese Versuchsbedingungen sogar unter der absoluten Farbunterscheidungswelle liegt (Mac Cree, 1960).

Auch eine kleine Änderung der Testfeldfarbe führt zu keinem signifikant unterschiedlichem Ergebnis. Das stimmt also wieder mit der Beobachtung aus Abb. 7 überein.

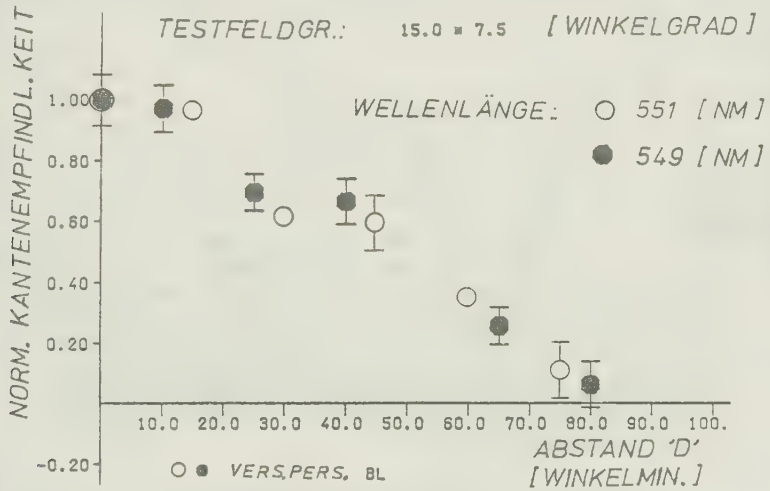


Abb. 8 Die ausgefüllten Achtecke bzw. Kreise wurden bei einem Testfeld der Filterkombination RG/OG gewonnen. Eine Änderung der Induktionsfarbe $\Delta\lambda$ = 2 nm ist für das Summationsverhalten aus den in 3.1 dargelegten Gründen unerheblich.

In Abb. 9 sind die Ergebnisse bei Variation der Testfeldgröße unter sonst gleichen Bedingungen dargestellt. Dabei wurde den Daten des Feldes mit 5° Ausdehnung nach der Methode der kleinsten Quadrate eine (sinc^{2}) - Funktion angepaßt. Auffallend ist der beiden Kurven gemeinsame Peripherieeffekt mit einem Maximum bei ca. 100' neben der abzugleichenden Kante. Dieser Effekt tritt auch bei anderen Testfeldbedingungen auf. Natürlich ist die (sinc^{2}) - Funktion nicht geeignet, diesen Peripherieeffekt zu beschreiben. Dennoch wurde diese Funktion gewählt, um den kantennahen Bereich fourieranalytisch zu beschreiben.

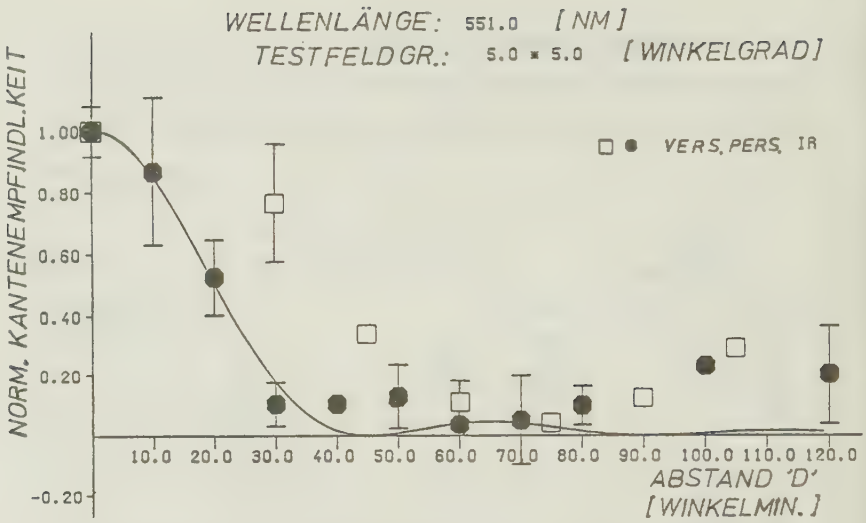


Abb. 9 Die Filterkombination RG/OG wurde hier zur Testfelderzeugung herangezogen. Die Quadrate wurden bei gleichen Farbdaten aber an einem 15° x $7{,}5^{\circ}$ grossen Testfeld gewonnen.

In Abb. 10 ist mit den ausgefüllten Symbolen das Ergebnis des Kantenabgleichs bei extrafovealer Betrachtung dargestellt. Fixiert wurde in diesem Fall auf eine Testmarke, die 2° von der Abgleichkante entfernt war. Das Ergebnis einer größeren Summationsweite weist darauf hin, daß die Feldgrößeneffekte durch Exzentrizitätseffekte beeinflußt werden. Die größeren Streuungen sind ein Maß für die Unsicherheit beim Farbabgleich. Mit einer ebenfalls vergrößerten Unsicherheit erfolgt der Kantenabgleich bei einem eingeschränkten Induktionsfeld (nicht ausgefüllte Symbole in Abb. 4). Die Zunahme der räumlichen Summation ist in diesem Fall aber kleiner. Auch eine Deutung dieser Ergebnisse folgt in Abschnitt 4.

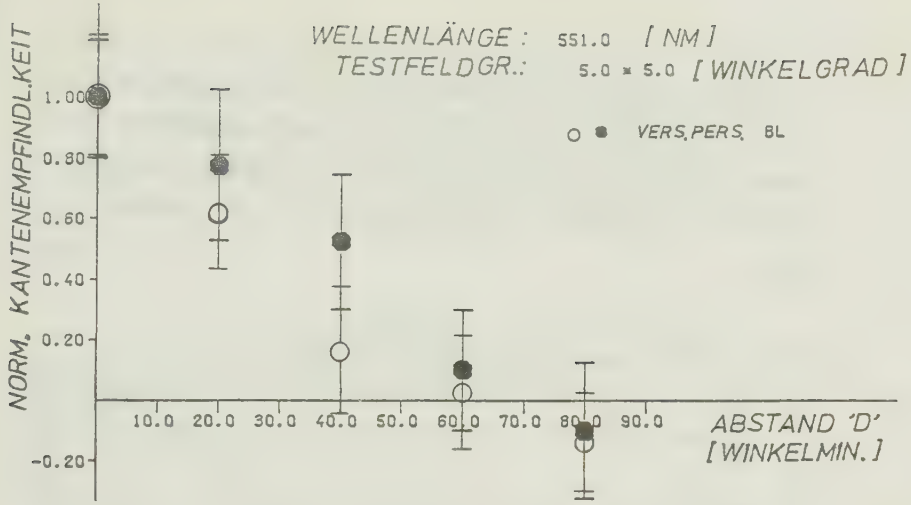


Abb. 10 Die Meßreihe wurde bei einer extrafovealen Betrachtung von etwa 1,8° gewonnen. Bei den Versuchen ○ wurde dem Beobachter ein im oberen Kantenbereich eingeschränktes Induktionsfeld dargeboten. In beiden Fällen lag die Filterkombination RG/OG vor. Die Werte ● wurden nachträglich in die Computerzeichnung eingetragen.

3.2 KORREKTUR DER INDUKTIONSLEUCHTDICHTE

Beim folgenden Versuch wurde ein Induktionsfeld verwendet, dessen Helligkeitsanteil kompensiert wurde.
Das Ergebnis der Abb. 11 zeigt, daß der Helligkeitsanteil der Induktionsfelder keinen Einfluß auf die Summationsweite hat. Hier sind für gleiche Testfeldfarbe und die Induktionsfarbe (λ = 499.0 nm) die Messungen ohne Helligkeitskompensation verglichen mit der in Abb. 15 für λ = 499.0 nm nochmals angegebenen Meßreihe, die mit diesem Helligkeitsausgleich gewonnen wurde. Obwohl die Messungen einmal am 5° Feld, das andere Mal am 2° Feld erfolgten, kann gesagt werden, daß die Helligkeitskompensation die Summationsweite nicht beeinflußt. Diese Aussage ist richtig, da Feldgrößeneffekte bei Feldern unter 5° Ausdehnung nicht beobachtet werden.

Auch ist wieder ein Peripherieeffekt beobachtbar, der also ebenfalls unabhängig von einem Helligkeitsausgleich auftritt. Die Leuchtdichtestufe des Induktionsfeldes führt demnach zu keinem "sichtbaren" Effekt. Bei unseren Versuchsbedingungen tragen nur Farbmechanismen zur Entscheidung bei.

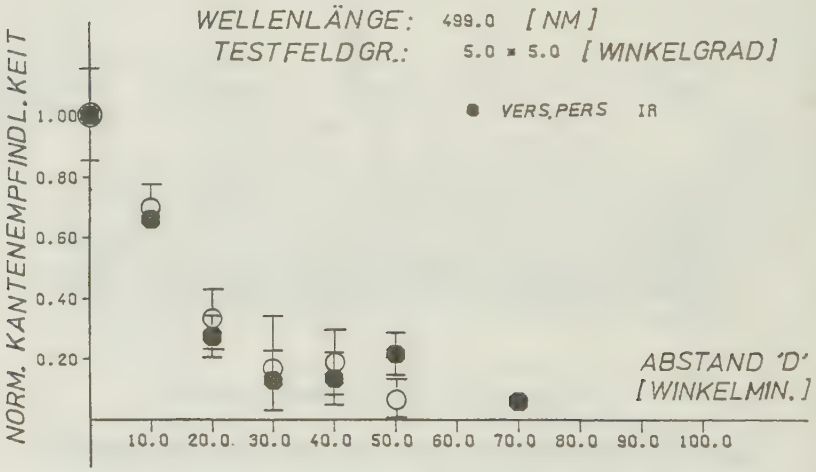


Abb. 11 Hier wurde die Filterkombination BG/RG verwendet. Die ausgefüllten Symbole wurden von (I.R.) ohne Korrektur der Leuchtdichte gewonnen, die nachträglich eingezeichneten Kreissymbole geben die Mittelwerte zweier Versuchspersonen bei gleichen Farbdaten, jedoch mit korrigierter Leuchtdichtstufe an.

3.3 INDUKTIONSFARBE UND SUMMATIONSWEITE

In Abb. 12 sind die Effekte unterschwelliger Induktionsfelder der Wellenlängen λ = 439 nm und λ = 664 nm an einem 2° - Feld der Filterkombination RG 610/2 und OG 590/1 gemessen worden. Nur die Werte für λ= 439 nm wurden mittels FIT interpoliert.

Auf der Ordinate aufgetragen ist die normierte G-Farbverschiebung. Bei diesen Wellenlängen mischt man dem Einstellfeld, welchem ja das Induktionsfeld überlagert ist, also mehr Grün (Orange) und entsprechend weniger Rot zu.

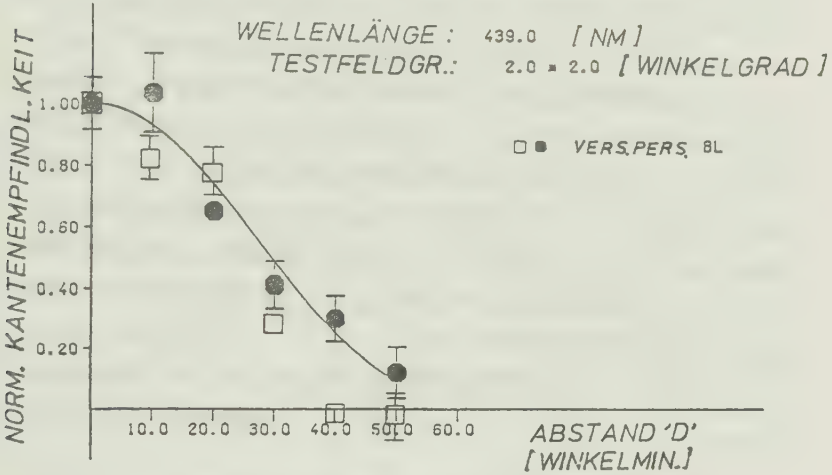


Abb. 12 Interpoliert wurden nur die Punkte der Meßreihe mit der Induktionsfarbe der Wellenlänge 439.0 nm. Die durch Quadrate dargestellten Meßwerte wurden bei der Induktionsfarbe λ = 664 nm gewonnen. Filterkombination: RG/OG

Bei gleicher Filterkombination des Testfeldes von nunmehr aber 5° Ausdehnung sind die Effekte bei einem unbunten Farbreiz (Normlichtart A) in Abb. 13 dargestellt. In diesem Fall ist an der Ordinate der normierte Zuwachs des Rotanteiles des Einstellfeldes angetragen. Auf die Überlagerung eines unbunten Induktionsreizes reagiert das visuelle System bei dieser Filterkombination mit einer R-Farbverschiebung.

Entscheidend ist also der CIE-Farbort bzw. die korrespondierende Wellenlänge des unterschwelligen Reizes. Ein Vergleich der Werte in Abb. 9, welche mit der Induktionsfarbe λ = 551 nm aber sonst gleichen Parametern gewonnen wurden, verdeutlicht die Unabhängigkeit der Summationsweite vom induzierenden Farbreiz. Da in Abschnitt 3.1 gezeigt werden konnte, daß bei Feldern unter 5^{o} Ausdehnung Feldgrößeneffekte unerheblich sind, zeigt auch der Vergleich der Abb. 12 und 13, daß der Farbort des Induktionsfeldes die Summationsweite nicht beeinflußt. Das zeigt auch die durch die Meßpunkte in Abb. 12 gelegte Kurve. Diese wurde durch Bestimmung des Parameters p (mittels FIT) in der Funktion

$$y = \left(\frac{\sin \pi px}{px}\right)^2$$

bestimmt.

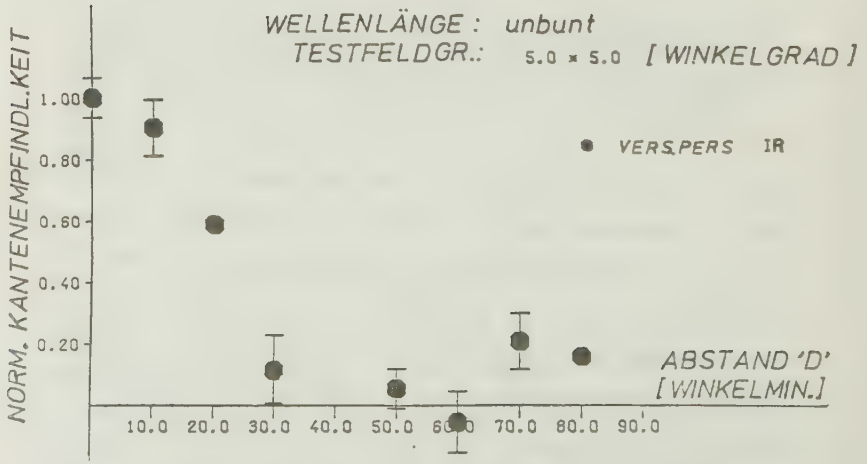


Abb. 13 Daten, welche an der Filterkombination RG/OG gewonnen wurden. Wellenlänge λ = 0.0 nm soll bedeuten, daß hier ein unbunter Induktionsreiz, d.h. ein weißes Induktionsfeld Verwendung fand.

Bei gleichen Farbparametern und bei einem Feld von 2° Ausdehnung erhält man jedoch engere Summationsweiten (Abb. 14). Dieser Effekt läßt sich durch eine höhere Induktionsintensität erklären. Das Induktionsfeld war in diesem Fall auf das Kriterium des "Gerade-nicht-mehr-Erkennens" eingestellt. Da in diesem Fall auf die 5° Unterschwelligkeit verzichtet wurde, sollte man diesen Fall mit "schwelliger" und nicht mit "unterschwelliger Summation" bezeichnen. Das bedeutet keinen Widerspruch zu den Ergebnissen aus Abschnitt 2.8, da dort festgestellt wurde, daß nur die zusätzliche Erniedrigung der bereits schwelligen oder unterschwelligen Induktionsintensität zu keinem deutlichen Effekt bezüglich der Summationsweite führte. (Bei maximaler Induktion und für die Wellenlänge λ = 551 nm wurde in Abb. 9 eine Verschiebung von 162 Digitalvoltmeter-Einheiten, in Abb.13 eine von 274 gemessen).

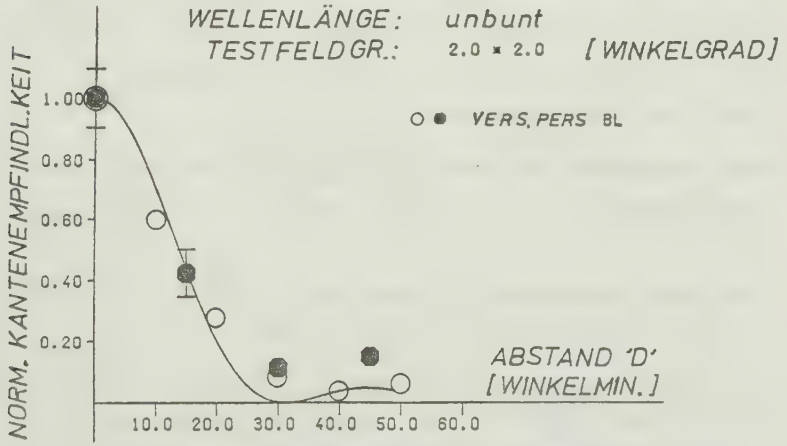


Abb. 14 Filterkombination: RG/OG. Die nachträglich eingezeichneten Kreissymbole entsprechen den Meßwerten bei der Induktionsfarbe λ = 551 nm. Wellenlänge λ = 0.0 nm soll bedeuten, daß ein unbunter (weißer) Induktionsreiz verwendet wurde.

Auch hier ist bei gegebener Farbe des Testfeldes die örtliche Summationsweite des "Kantendetektors" (gemeint ist hier der Mechanismus, der die Decrement-Schwelle bestimmt) unabhängig von der Induktionsfarbe, wie der Vergleich in Abb. 14 zwischen unbuntem und monochromatischem Testreiz zeigt.

Die folgenden Ergebnisse zeigen, daß diese Aussage auch für andere Farborte der Testfarben gilt. Die Ergebnisse in Abb. 15 wurden an einer Blau-Rot-Kante (Filterkombination BG 28/1 und RG 610/2) gewonnen. Bei dieser Testfarbe wurden die drei Induktionsfarben der Wellenlängen λ = 551 nm, λ = 664 nm und λ = 499 nm herangezogen. Bei einem blauen und grünen Induktionsfeld stellten die Versuchspersonen mehr Rot nach ("positive" Ordinate). Hingegen beobachtete man beim roten Induktionsfeld eine Verschiebung des Farbverhältnisses zugunsten des blauen Anteils ("negative" Ordinate). Hier wurde übrigens wieder ein Helligkeitsausgleich des Induktionsfeldes vorgenommen.

Die Summationsweiten hängen also auch nicht von dem Farbort des Testfeldes ab, wie Vergleich der Abb. 12 und 15 ergibt.

Die Ergebnisse der Abb. 16 bestätigen die Behauptungen nochmals. Hier wurde eine Blau-Grün-Kante (Filterkombinationen BG 28/1 und VG 9/2,55) kombiniert mit einem blauen Induktionsreiz der Wellenlänge λ = 439.0 nm. Entsprechend mischte die Versuchsperson dem Einstellfeld mehr Grün zu.

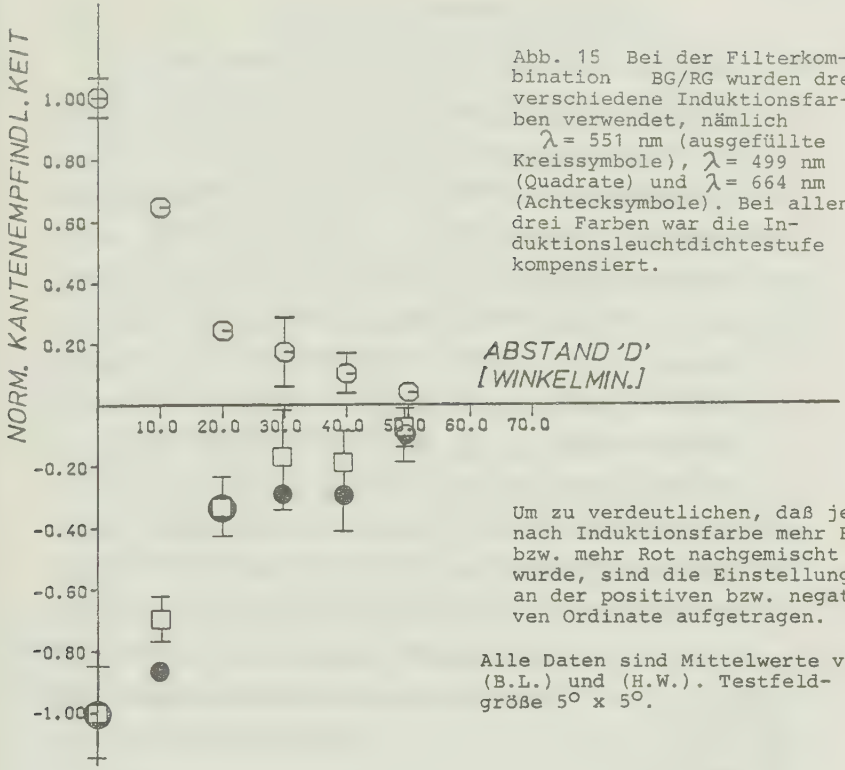


Abb. 15 Bei der Filterkombination BG/RG wurden drei verschiedene Induktionsfarben verwendet, nämlich λ = 551 nm (ausgefüllte Kreissymbole), λ = 499 nm (Quadrate) und λ = 664 nm (Achtecksymbole). Bei allen drei Farben war die Induktionsleuchtdichtestufe kompensiert.

Um zu verdeutlichen, daß je nach Induktionsfarbe mehr Blau bzw. mehr Rot nachgemischt wurde, sind die Einstellungen an der positiven bzw. negativen Ordinate aufgetragen.

Alle Daten sind Mittelwerte von (B.L.) und (H.W.). Testfeldgröße 5^{o} x 5^{o}.

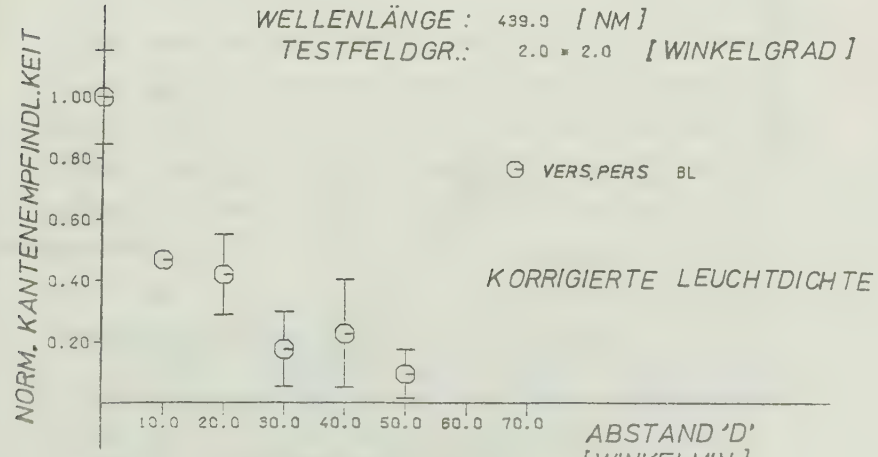


Abb. 16 Filterkombination: BG/VG.

3.4 UNBUNTER KANTENDETEKTOR

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, daß bei bunten Testfeldern nur der Farbanteil und nicht der Helligkeitsanteil des Induktionsreizes den "Farbkantendetektor" beeinflußt. Bei unbunten Testfeldern hingegen beeinflußt aber auch eine unterschwellige Helligkeitskante den "Unbuntkantendetektor". In Abb. 17 sind die Ergebnisse des Helligkeitsabgleichs in Abhängigkeit der räumlichen Lage des unbunten Induktionsreizes bei zwei verschiedenen Feldgrößen dargestellt. Im Gegensatz zu den bunten Testfeldern tritt eine deutliche Inhibition auf. Der Feldgrößeneffekt tritt wieder ab ca. 5^{o} Feldgröße auf (Ergebnisse des 5^{o} Feldes nicht dargestellt). Insgesamt ist die räumliche Summationsweite aber deutlich schmäler und eine deutliche Inhibition beobachtbar.

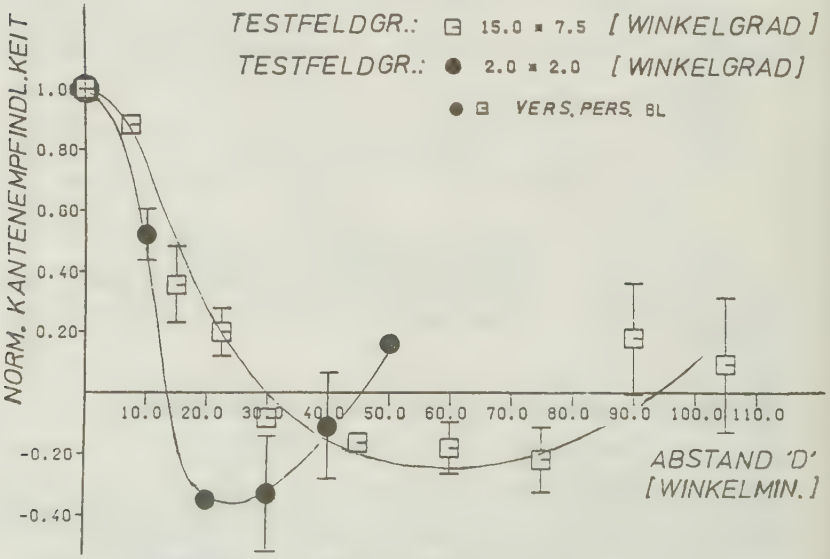


Abb. 17 Testfeld und Induktionsreiz waren hier unbunt (weiß). Der veränderten Versuchsbedingung, nämlich Abgleich einer Helligkeitskante, entsprechen andere Ergebniskurven. Diese enthüllen nämlich laterale Inhibition. Die ausgefüllten Kreissymbole entsprechen dem 2^{o} x 2^{o} - Feld, und unterscheiden sich kaum von den nichteingezeichneten 5^{o} x 5^{o}-Feldwerten. Die Kurven wurden ohne Interpolationsverfahren gewonnen.

4. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

4.1 FELDGRÖßENEFFEKTE

Feldgrößeneffekte sind ab etwa 5° Feldgröße beobachtbar. Das bedeutet, daß auch periphere Mechanismen die Farbkantendetektion beeinflussen. Nachdem die Summationsweiten aber stets unter 2° lagen, erfolgte die Farbkantendetektion bei unseren Versuchen jedoch in der Fovea und deren corticalen Projektion. Dafür spricht auch die Tatsache, daß in den Projektionsgebieten der Parafovea in den (Streifen-) Cortex weniger farbcodierte Zellen neurophysiologisch nachgewiesen werden können (Hubel und Wiesel, 1968) als in den Projektionsgebieten der Fovea in denselben Cortexbereich (Poggio, Mansfield, Sillito, 1971). Das Detektionsprinzip scheint bei allen Testfeldgrößen gleich zu bleiben. Denn die Summationskurven werden zwar breiter, behalten aber die Kurvenform bei. Insbesondere dürften auch bei großen Testfeldern vornehmlich die Zapfensignale zur (reinen) Farbmusterdetektion beitragen. Aber auch in Abschnitt 4.2. wird das bekräftigt. Die größere laterale Summation bei großen Testfeldern wird auch durch die variable Größe retinaler Felder erklärt. In der Ebene der Ganglienzellen hatte Kuffler (1953) elektrophysiologisch nachgewiesen, daß die Größe des rezeptiven Feldes nicht nur von der Intensität des Reizes und dessen Fläche, sondern auch von der Gesamtbeleuchtung der Retina abhängt. Der Befund von Yarbus (1967), wonach bei größeren Testreizflächen auch die unwillkürlichen Augenbewegungen eine größere Amplitude annehmen, trägt zur Klärung des Feldgrößeneffektes wenig bei.

Zum einen müßten unwillkürliche Augenbewegungen stetig von kleinen zu großen Feldern zunehmen, zum anderen brauchten die Versuchspersonen ja nicht zu fixieren.

Die größeren Standardabweichungen in Abb. 10 lassen sich mit der größeren Unsicherheit der Versuchsperson beim Abgleichprozeß erklären. Die Erklärung für die größere Summationsbreite bei parafovealem Abgleich folgt aus einer Verallgemeinerung der Ergebnisse von Yund und Armington (1975). Diese beobachteten nämlich, daß (überschwellige!) Ecken um so mehr zur Farbton- und Helligkeitsbestimmung in einem Punkt beitragen, je näher diese an dem Punkt liegen. Unsere Ergebnisse legen nahe, daß sich dieser Schluß auch auf unterschwellige Kanten ausweiten läßt.

4.2 KORREKTUR DER INDUKTIONSLEUCHTDICHTE

Es gibt vielfach Beispiele für die Wechselwirkungen zwischen Helligkeits- und Farbkanälen.

Neurophysiologisch gelang u.a. Barlow und Levick (1968), Donner und Rushton (1959), Whitten und Brown (1973) der Nachweis, daß es Ganglienzellen gibt, welche sowohl Zapfen- als auch Stäbchensignale verarbeiten können. Andererseits gelang Alpern (1965) der Nachweis, daß Lichtblitze, welche speziell die Stäbchen erregen, die Empfindlichkeit der Zapfen nicht herabsetzen. Westheimer (1970) zeigte umgekehrt im Stäbchen- und Zapfengebiet (ca. 8^{o} parafoveal), daß Signale, welche innerhalb des Stäbchensystems die Empfindlichkeit zu steigern vermögen, keine Empfindlichkeitssteigerung des Zapfensystems bewirken können. Mac Leod (1972) zeigte andererseits bei mesopischen Bedingungen, daß Stäbchen die Zapfenreaktionen

bei Flickerlicht maskieren. Die zahlreichen weiteren Literaturstellen lassen den Schluß zu, daß je nach Versuchsbedingungen unterschiedliche und zum Teil widersprüchliche Aussagen getroffen werden können.
Bei unseren Versuchen trifft zu, daß die Stäbchen, sofern sie überhaupt direkt am Farbempfinden beteiligt sind, zu allen Farb- bzw. Gegenfarbkanälen gleichmäßig beitragen. Damit wird bekräftigt, daß nur unter ganz besonderen Versuchsbedingungen, z.B. bei Mc Cann (1972), ein direkter Beitrag der Stäbchen zur Farbempfindung beobachtbar ist.
Als wichtiges Ergebnis folgt jedoch noch aus den Helligkeitskompensationen, daß nur der Farbanteil des unterschwelligen Reizes zur Kantendetektion beiträgt und nicht auch dessen Farbhelligkeitsanteil. Erklärbar wäre dieser Befund durch die konstante Hellempfindung der nachgemischten Farben, wonach also nur Farbkanäle zur Detektion herangezogen wurden. Übrigens fand auch Green (1968), daß der Kontrast eines grünen Gitters auf einem photopischen roten Hintergrund nicht von der augenscheinlichen Helligkeit des letzteren sondern von dem Ausmaß mit welchem er die Grünkanäle erregte, bestimmt wird.
Auch der bisweilen zu beobachtende Peripherieeffekt tritt unabhängig von der Helligkeitskompensation auf. In periphereren Gebieten nimmt die Anzahl der Stäbchen zwar zu und die der Zapfen ab, dennoch legen die Beobachtungen von Westheimer (1970) und Alpern (1965) die Vermutung nahe, daß es sich bei diesen Peripherieeffekten um Zapfenreaktionen handelt. Laterale Wechselwirkungen von etwa 1^{o} Ausdehnung werden bekanntlich von Amakrinzellen und sogar schon von Horizontalzellen hervorgerufen.

4.3 SUMMATIONSWEITE UND INDUKTIONSWELLENLÄNGE

Bei den Versuchen wurde nicht festgestellt, daß die Induktionswellenlängen die Summationsweiten beeinflussen.

Am ehesten wären bei Verwendung sehr kurzwelliger (aber noch sichtbarer) Induktionswellenlängen größere Summationsweiten zu erwarten gewesen. Denn van der Horst (1969) beobachtete bei Schwellenmessungen im R-G-System Summationsweiten der (Linien-) Impulsreaktionsfunktionen von 12', im Y-B-System solche von 25'. Auch liegt das Maximum der Kontrastempfindlichkeit im Blaurezeptorensystem bei niedrigeren Ortsfrequenzen als in den isolierten Rot- oder Grünsystemen (Kelly, 1974). Man erklärt dies allgemein mit der durch die Macula Lutea bedingten Blau-Blindheit im Bereich der Fovea centralis. Nach Wald (1967) bedeutet diese partielle Blindheit einen großen Vorteil bei Akkomodations- und bei Fixationsvorgängen und somit überhaupt einen Selektionsvorteil. Da bei unseren Versuchen nicht fixiert wurde, wirkt sich diese partielle Blaublindheit auch nicht aus. Insbesondere wirkt sich die Blaublindheit in der Detailerkennbarkeit blau-gelber Konturen aus. Da wir relativ "niederfrequente" Muster verwendeten, wäre vermutlich auch bei Fixation keine Änderung der Summationsweite beobachtet worden.

4.4 UNBUNTER KANTENDETEKTOR UND MACHSTREIFEN

Die Methode der unterschwelligen Summation in Helligkeitskanälen fand z.B. Eingang bei den Versuchen von Shapley und Tolhurst (1973) und Kulikowski und King-Smith (1973), nachdem Tolhurst (1972) der Nachweis der Existenz von (unbunten) Kantendetektoren gelang.

Der wesentlichste Unterschied zwischen "Farbkantendetektoren" und unbunten Kantendetektoren ist das Fehlen der lateralen Inhibition bei der Farbkantendetektion. Die laterale Inhibition in den Helligkeitskanälen kann als direkter Nachweis für Machstreifen gelten (von Békésy, 1968).

Außerdem weist die geringere laterale Summationsweite bei der Detektion von Helligkeitskanten darauf hin, daß die Helligkeitskanäle stärker auf Kantendetektion ausgerichtet sind. Das wiederum ist in Einklang mit dem Befund, daß der Bandpaßcharakter der Helligkeitskanäle deutlich ausgeprägt ist. Die deutlich ausgeprägte laterale Inhibition bei unbunten Kantendetektoren ist sowohl bei unseren Versuchen als auch bei denen von Kulikowski und King-Smith (1973) zu beobachten. Zu klären ist jedoch, weshalb die Kantendetektoren bei Kulikowski und King-Smith (1973) noch geringere laterale Summationsweiten aufweisen.

Vier Gründe dürften für den Unterschied verantwortlich sein.

1.) Bei Kulikowski und King-Smith wurden Increment-Schwellen als Testkriterien verwendet, bei unseren Versuchen hingegen Decrement-Schwellen.

2.) Bei Kulikowski und King-Smith waren zu beiden Seiten der Testkante unterschwellige Kanten vorhanden, bei unseren Versuchsbedingungen nur eine. Das entspricht einer halbierten "Induktionsenergie."

3.) Zwar waren die runden Testfelder bei Kulikowski und King-Smith mit $2{,}5^{\circ}$ Durchmesser unseren $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ - Feldern vergleichbar, doch hatten die Versuchspersonen bei Kulikowski und King-Smith zu fixieren.

4.) Während bei uns die unterschwellige Helligkeitskante in ihrer Intensität im Verlauf des Versuches nicht geändert wurde, geschah dies bei Kulikowski und King-Smith. Dort wurden in einer Versuchsreihe die Increment-Schwellen für verschiedene Kontraste der unterschwelligen Kanten bestimmt.

5. MODELLBETRACHTUNGEN ZU DEN EXPERIMENTELL GEWONNENEN ERGEBNISSEN

Die Methode der unterschwelligen Summation eignet sich gut, bei der Farbmusteranalyse beteiligte Prozesse aufzudecken. Die gewonnenen Einblicke in das komplizierte biologische System der Mustererkennung sollen durch ein Modellsystem beschrieben werden. Dabei werden bekanntere Ansätze zur partiellen Beschreibung visueller Verarbeitungsphänomene aufgegriffen und zu Modellen entwickelt, welche den Versuchsergebnissen eine quantitative Aussagekraft verleihen. Die einzelnen Modellvorstellungen werden diskutiert und untereinander und mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Schließlich wird dem Konzept der "trichomatischen Zellen" bzw. eines "Farbkantendetektors" im Sinne der Wahrscheinlichkeitssummation der Vorzug gegeben.

5.1 DEFINITION DES FARBKANTENDETEKTORS

Es ist bekannt, daß alle Zellen innerhalb des Systems Retina bis Cortex eine selektive Empfindlichkeit für bestimmte Merkmale von Bildern aufweisen, falls die Bilder auf ihr rezeptives Feld treffen. Hubel und Wiesel (1962 und 1968) fanden im visuellen Cortex von Katze und Affe Neuronen, welche spezifisch auf Lichtbalken bestimmter Orientierung und Größe reagieren. Von farbcodierten Neuronen im Geniculatum laterale mit Zentrumserregung und Umgebungshemmung berichtet de Valois (1973). Aber auch farb- und bewegungsspezifische Zellen sind bekannt.

Im visuellen Cortex entdeckte z.B. Zeki (1973) farbcodierte Neurons, welche vornehmlich auf blaue Balken bestimmter Größe reagierten, sofern diese in einer bestimmten Richtung bewegt wurden. Auch wenn Gouras (1972) behauptet, daß die Farbspezifität in dem Maße zunimmt (abnimmt), wie die Musterspezifität abnimmt (zunimmt), bleibt es dennoch richtig, daß jedes Neuron eine selektive Empfindlichkeit aufweist.

Neurons, deren rezeptive Felder ein balkenförmiges erregendes Zentrum aufweisen, das auf nur einer Seite an ein hemmend wirkendes Areal grenzt (Hubel und Wiesel, 1962), nennt man einfache Kantendetektoren. Entscheidend ist hiermit also, daß diese Neurons nur auf Kanten ganz bestimmter Polarität reagieren (Tolhurst, 1972). Kanten umgekehrter Polarität hemmen dieses Neuron oder erzeugen gar keine Antwort. Bei den Versuchen zur unterschwelligen Summation war ebenfalls eine Polarität zu beobachten. Denn eine unterschwellige Induktionskante stimulierte je nach Farbe zum Zumischen mehr des einen oder des anderen Glasfilteranteiles des Testfeldes. Es ist also gerechtfertigt, einen "Farbkantendetektor" zu definieren. Wie dieser realisiert sein könnte, soll in den folgenden Abschnitten untersucht werden.

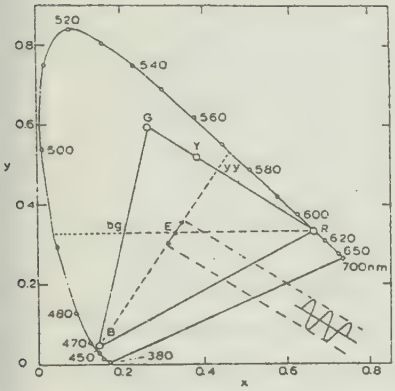
5.2 DIE ERGEBNISSE DER UNTERSCHWELLIGEN SUMMATION IM LICHTE DER FOURIERMETHODE

Campbell und Robson (1968) zeigten, daß das menschliche visuelle System bei manchen Sehaufgaben so vorgeht, als ob das retinale Bild nach Fourier analysiert würde. Verschiedene Fourierkomponenten werden nach dieser Vorstellung durch

unterschiedliche Gruppen von Neuronen verarbeitet. Diese Gruppen können dann selektiv adaptiert und angeregt werden. Modellmäßig stellt man sich diese Neuronengruppen als parallele Bandpaßfilter vor, an deren Ausgang sich jeweils ein eigener Detektor befindet. Zur Analyse des menschlichen Farbsinnes wurden äquiluminante, farbmodulierte Sinusgitter erstmals von Schade (1956) herangezogen. Untersuchungen mit Rechteckgittern folgten u.a. von van der Horst (1967), Schober und Munker (1967). Versuche mit sinusmodulierten Gittern stammen noch von van der Horst und Bouman (1969). Kennt man bei einem linearen System die Sinusgitterreaktionsfunktion, dann kann man nach der Fouriermethode die Antwort des Systems auf jeden beliebigen Reiz vorhersagen. Kulikowski und King-Smith (1973) bestimmten nach dieser Methode die "Linien-", "Gitter-" und "Kantenempfindlichkeit" des Kantendetektors. Es wird nun gezeigt, daß die Methode der Fourieranalyse, auf die Farbkanäle angewendet, interessante Eigenschaften dieses Systems erkennen läßt.

In Abb. 18 a) ist ein gelb-, blaumoduliertes äquiluminantes Sinusgitter im CIE-Farbraum dargestellt. Van der Horst (1969) bestimmt die Schwellen dieser farbmodulierten Sinusgitter im Weißpunkt E und konnte auf Grund der stückweisen Linearität des visuellen Systems die Empfindlichkeit des Systems auf Rechtecks- und Dreiecksreize vorhersagen. Dazu entwickelte er die Dreiecks- und Rechtecksreize in eine Fourierreihe und betrachtete das Verhältnis der einzelnen Komponenten.

In Anhang III wird ausgeführt, wie man sich die Methoden der Fourierzerlegung äquiluminanter Farbmuster vorzustellen hat. Außerdem ist dort gezeigt, daß die Methode der Fourierzerlegung auch in anderen Punkten als dem Weißpunkt E des Farbdreiecks erfolgen kann.



ɔb. 18a In dieser Zeichnung ɔn van der Horst (1969) ist für ɛn Weißpunkt E ein blaugelb- ɔduliertes Sinusgitter .ngezeichnet. In Anhang III .rd diese Methode verallge- ɛinert.

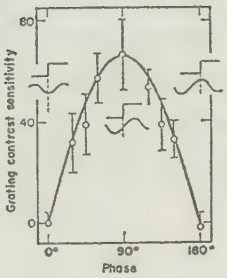


Abb. 18b Dargestellt sind die Daten von Kulikowski und King-Smith (1973). Entsprechend gilt, daß der Farbkantendetektor auch vom Sinustyp ist.

Insbesondere sind diese Methoden auf unsere Versuchsbedingungen anwendbar.

Ein eindimensionales und äquiluminantes Farbmuster C(x) kann durch ein reelles Fourierintegral folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$C(x) = \int_0^{\infty} [\, A(f)\cos 2\pi f x + B(f)\sin 2\pi f x \,]\, df$$

wobei $$A(f) = 2\int_{-\infty}^{+\infty} C(x)\cos 2\pi f x\, dx$$

und $$B(f) = 2\int_{-\infty}^{+\infty} C(x)\sin 2\pi f x\, dx$$ bedeuten.

Die Ausdrücke A(f) und B(f) entsprechen also den Amplituden der Cosinus- uns Sinuskomponenten bei einer Raumfrequenz f. Dann läßt sich zeigen (vgl. Anhang III), daß die Gitterempfindlichkeit der Farbkante von der Phase zwischen der Farbkante und dem farbmoduliertem Gitter abhängt und außerdem vom Sinustyp ist. In Abb. 18 b sind die entsprechenden Verhältnisse für ein helligkeitsmoduliertes Gitter bei Kulikowski und King-Smith (1973) dargestellt. Das bedeutet also, daß ein Farbkantendetektor nur auf die Sinuskomponenten B(f)

reagiert und bei der Fourierentwicklung nur diese berechnet werden müssen. Die Entwicklung einer Farbkante C(x) der Form:

$$C(x) = \begin{cases} C & -L \leq x < x_0 \\ C + \Delta C & x_0 \leq x \leq L \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

ergibt für die gesuchten Komponenten B(f) (vgl. Anhang III):

$$B(f) = 2 \cdot \Delta C \cdot \frac{\cos 2\pi f x_0}{2\pi f}$$

und die Kontrastkomponenten:

$$\frac{B(f)}{C} = 2 \cdot \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{\cos 2\pi f x_0}{2\pi f}$$

Entsprechend den Experimenten untersucht man also die Kantenempfindlichkeit des Kantendetektors. Wenn nun $S_g(f)$ die Farbgitterempfindlichkeit des Kantendetektors ist, ergibt sich die Reaktion des Kantendetektors auf eine Kante innerhalb des linearen Bereiches zu:

$$\tilde{R}(x_0) = \frac{2 \cdot \Delta C}{C} \int_0^\infty S_g(f) \cdot \frac{\cos 2\pi x_0 f}{2\pi f} \, df$$

Der Faktor vor dem Integral hängt von der Unterschwelligkeit der induzierenden Kante ab. Da die Ergebnisse ohnehin in normierter Form dargestellt sind, kann dieser Faktor vernachlässigt werden, indem man definiert

$$R(x_0) := \frac{C}{2 \cdot \Delta C} \tilde{R}(x_0)$$

und später das Integral $R(x_0)$ auf 1 normiert. Ein wesentlicher Unterschied zu den Überlegungen von Kulikowski und King-Smith liegt übrigens in der Ortsabhängigkeit der Antwort $R(x_0)$. Kulikowski und King-Smith setzten $R(x_0)$ konstant voraus, da sie die Systemreaktion an einer ganz bestimmten Stelle, nämlich an der Schwelle untersuchten.

Bevor nun die Gitterempfindlichkeitsfunktion $S_g(f)$ bestimmt wird, hat man den Ausdruck $R(x_o)$ auf Konvergenz zu prüfen. Da der Ausdruck $\cos(2\pi f x_o)/(2\pi f)$ für $f \rightarrow o$ nicht konvergiert, muß entweder $S_g(f)$ mit der Ordnung von $2\pi f$ (mit $f \rightarrow o$) gegen Null gehen, oder man schränkt den Integrationsbereich ein. Es ist naheliegend, den Integrationsbereich einzuschränken, denn das Gesichtsfeld umfaßt ca. 160° (lateral 100°, nasal ca. 60°). Andererseits kann eine Gitterempfindlichkeitsfunktion erst ab ca. einer Periode pro Gesichtsfeld, also ab einer Periode pro 160°, Erregungszustände beschreiben. Da das Farbgesichtsfeld sogar noch kleiner als das für reine Helligkeitssignale ist, kann die untere Integrationsgrenze ohne Bedenken mit $u = 0.01$ angegeben werden. Die obere Integrationsgrenze g wird durch die Streuung der Augenmedien bestimmt. Sie wird auf keinen Fall 30 Perioden pro Grad überschreiten:

$$R(x_o) = \int_{u=0.01}^{g=30} S_g(f) \, \frac{\cos 2\pi f x_o}{2\pi f} \, df$$

Da $R(x_o)$ die experimentell ermittelte Systemantwort darstellt, also bekannt ist, muß die Funktion $S_g(f)$ aus obiger Gleichung bestimmt werden. Hierzu wurde der folgende Ansatz für $S_g(f)$ gemacht: $S_g(f) = k \cdot e^{-\frac{f^2}{a}}$

Dann wurde der Koeffizient a in dem Ausdruck für S_g mittels FIT (vgl. Abschnitt 3) so berechnet, daß die Summe der Abweichungsquadrate der Meßpunkte (als Beispiel dienten die der Abb. 14) von der Kurve $R(x_o)$ minimal wurde. Der Ansatz für $S_g(f)$ wurde auf Grund folgender Beobachtung gemacht. Differenziert man obige Gleichung - allerdings mit $S_g(f) = e^{-af^2}$ - nach x_o so erhält man (mit den Integrationsgrenzen u=o,o1 g = ∞):

$$R'(x_o) = -\int_{u}^{\infty} e^{-af^2} \sin 2\pi f x_o \, df$$

Die rechts stehende Formel ist bekanntlich gleich dem Integral von Dawson (Abramowitz und Stegun, 1972) (mit u = o) und dieses Integral wiederum gleicht sehr der Ableitung der durch die Meßpunkte gelegten Kurve. Die bekannte Integralformel von Dawson lautet nämlich:

$$\int_0^\infty e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt = \frac{1}{\sqrt{a}}\, e^{-\frac{x^2}{a}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{a}}} e^{t^2}\, dt$$

(Dawsons Integral)

Da die untere Integrationsgrenze allerdings zu u > o aber $u \ll 1$ angenommen wird, sollte man den daraus resultierenden Fehler der Integralformel von Dawson abschätzen. Dies wird im Anhang I zu dieser Arbeit unternommen.

Nach entsprechender Normierung erhält man für die Konstante a den Wert a= 0.50 und somit für die Gitterempfindlichkeit des Kantendetektors (für die für Abb. 14 geltenden Versuchsbedingungen) den Ausdruck: $S_g(f) = e^{-\frac{f^2}{0.50}}$

Die Modellantwortkurve $R(x_o)$ bzw. die Gitterempfindlichkeit des Kantendetektors wurden mittels eines Fortranprogrammes (FUPLOT, PSPLIN) gezeichnet (Abb. 19 a bzw. 19 b).

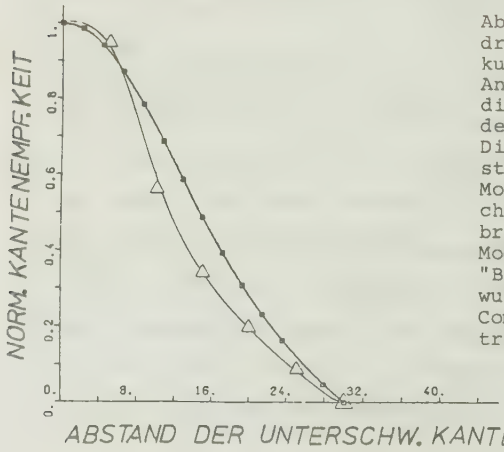


Abb. 19a Die kleinen Quadrate beschreiben die Modellkurve, welche sich aus dem Ansatz $S_g(f)=\exp(-f^2/a)$ für die Gitterempfindlichkeit des Kantendetektors ergibt. Die durch Dreiecke dargestellte Kurve folgt aus dem Modell (vgl.Anhang II), welches musterabhängige Bandbreiten berücksichtigt. Die Modellkurve, welche aus dem "Bandbreitenmodell" folgt, wurde nachträglich in die Computer-Zeichnung eingetragen.

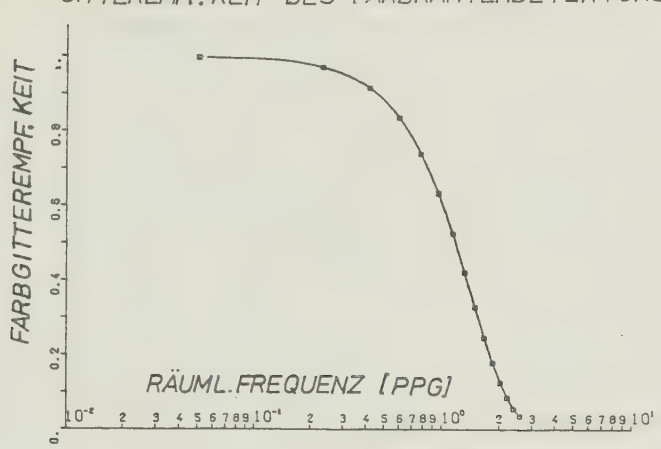


Abb. 19b Die Gitterempfindlichkeitskurve. Der Übersichtlichkeit wegen ist die Schar der cos-förmigen Tiefpaßkurven des "Bandbreitenmodells" im Anhang II dargestellt. Zeichnung 19 b) wurde ebenfalls mittels eines Computerprogrammes angefertigt.

Aus Abb. 19 b kann man folgern, daß das visuelle System bei unseren Versuchsbedingungen für die Farbinformation als Tiefpaßfilter wirkt. Dies ist in Übereinstimmung mit Befunden, die van der Horst, de Weert und Bouman (1967) und van der Horst (1969) an reinen Chromatizitätsgittern erhoben. Daraus ist zu folgern, daß es zwischen Elementen des R/G-Kanals keine laterale Inhibition gibt. Es kann aber durchaus Inhibition zwischen dem R- und G-System stattfinden (vgl. Ingling und Drum, 1973), nur keine Inhibition zwischen bereits kombinierten R-G-Kanälen. Es gibt auf dieser Stufe des visuellen Systems somit keine doppelt gegenkodierten Neurone, also keine sowohl räumlich als auch farbspezifisch gegensätzlich kodierten Zellen, wie beim Goldfisch (Spekreijse und van den Berg, 1971). Kelly (1974) jedoch berichtet von einem Empfindlichkeitsabfall bei niedrigen räumlichen Frequenzen.

Auch Green (1968) beobachtet bei seinen Versuchen einen Empfindlichkeitsabfall bei kleinen räumlichen Frequenzen, der allerdings flacher verläuft als bei Kelly (z.B. 1974).

Gemeinsames Merkmal aller Versuche, bei denen Bandpaß-verhalten innerhalb des Farbübertragungssystem beobachtet wurde, ist zunächst einmal die Adaptation zweier Zapfen-systeme (beschrieben u.a. in einer neueren Arbeit (1974) von Stiles und Wyszecki), so daß das dritte Zapfensystem isoliert betrachtet wurde. Das Bandpaßverhalten ist demnach zunächst auf den gleichen Farbkanal beschränkt. Innerhalb eines Farbkanals treten also Wechselwirkungen zwischen Zentrum und umgebenden Gebiet auf. Den elektrophysiologischen Nachweis für solche Verschaltungen konnten Enroth-Cugell und Robson (1966) für retinale Ganglienzellen zumindest an Katzen erbringen. Ähnlich beobachtet Bender (1973) exzitatorische Wechselwirkungen nur zwischen verschiedenen spektralen Mechanismen, inhibitorische nur innerhalb eines Farbkanals. Diese Befunde werden durch Versuche von Sharpe (1974) ergänzt, der Inhibition auch zwischen spektral verschieden kodierten (Sinus-) Musterdetektoren und damit Bandpaßverhalten auch "zwischen Farbkanälen" nachwies. Da diese Gegenfarbinhibition jedoch stärker interokular übertragen wird als Gleichfarbeninhibition, findet sie auch in zentraleren Mechanismen statt. Dort dürfte aber auch nach Experimenten von Gouras (1972) bereits eine weitgehende Auftrennung der Gesamtinformation in Farb- und Musteranteil stattgefunden haben.

In Übereinstimmung hierzu war bei den Versuchen Sharpes (1974) Testkriterium "Erkennen eines Sinusgitters bei Anwesenheit eines weiteren Sinusgitters" und nicht "Erkennen einer Farbe." In Erinnerung gebracht sei, daß bei den Versuchen von van der Horst, de Weert und Bouman (1967) und van der Horst und Bouman (1969) R/G- oder Y/B-modulierte Gitter verwendet wurden, also der Musteranteil wie bei unseren Versuchen nicht groß war. Damit ist zu erwarten, daß die Detektion einfacher Muster in Bereichen unvollständiger Auftrennung zwischen Farbe und Muster, also noch im Bereich der bekannten R/G- bzw. Y/B-Kanäle stattfindet.

Bei genauer Betrachtung der Versuchsbedingungen, welche Bandpaßverhalten der Farbkanäle enthüllen, ist zu bedenken, daß die Autoren zwar zwei Farbkanäle adaptierten, im untersuchten Farbkanal allerdings die Intensität der Farbe und nicht deren reine Chromatizität modulierten. So treten die Tiefpaßeigenschaften bei allen Autoren deutlich hervor, die nur mit Chromatizitätsmodulation arbeiten, die Bandpaßeigenschaften jedoch, wenn die Intensitätsunterschiede (im Sinne einer Farbhelligkeit) nicht ausgeglichen wurden. Schade (1958) berichtet zwar von Bandpaßstrukturen, die auch bei angeblich ausgeglichener Farbhelligkeit, hervortreten. Genauere Nachmessungen von Granger und Heurtley (1973) ergeben jedoch, daß Schades Daten nicht korrekt sind.

Abschließend sei bemerkt, daß auch ein weiterer Lösungsansatz das Tiefpaßverhalten der Farbkantendetektion deutlich machte.

Die Filterkurven lassen sich in diesem Fall durch cos-Funktionen beschreiben. Da diese Tiefpässe von variabler Bandbreite sind, ergeben sich interessante Vergleichsmöglichkeiten mit von Quick und Reichert (1973) erhobenen Befunden. Diese Ergebnisse sind im Anhang II dargestellt.

Aus der Diskussion folgende Verschaltung der Farbkanäle:

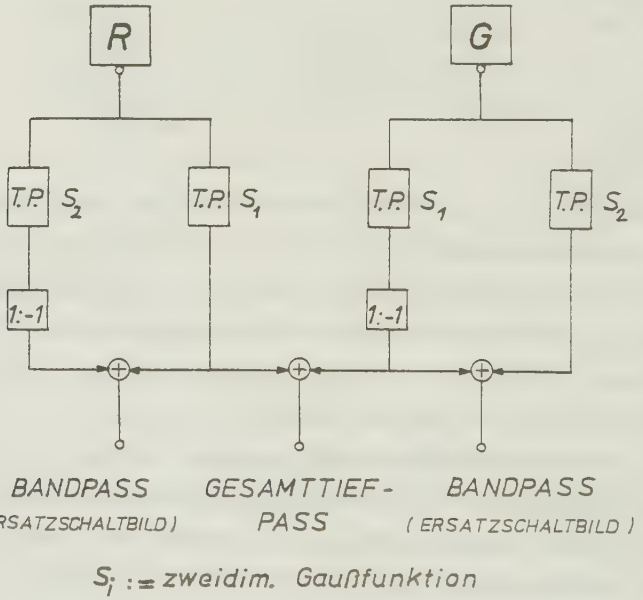


Abb. 19 c Dieses Blockschaltbild veranschaulicht am Beispiel der Rot- und Grünkanäle schematisch die aus der Diskussion zu folgernden Verknüpfungen innerhalb der und zwischen den Farbkanälen. Diese Verschaltungen bestehen ebenfalls zwischen den Blau- und Gelbkanälen. Ebenso sind zwischen den Farbkanälen Wechselwirkungen zwischen off-Einheiten möglich. Dieses Modell beschreibt das Verhalten innerhalb der Farbkanäle bandpaßartig, die Wechselwirkung zwischen den Kanälen tiefpaßartig und berücksichtigt durch die Wahl von Filterkuven die örtliche Verteilung von Farben. Dieses Modell bedeutet demnach eine wesentliche Erweiterung des Zonenmodells von Walraven (1962).

5.3 DIE DATEN IM LICHTE EINES REZEPTIVEN-FELD-MODELLES

In Abschnitt 5.2 wurde gezeigt, daß für ein Fourierzerlegungsmodell viele qualitative Beobachtungen sprechen, und daß eine Anwendung der Fouriertechnik ein partielles Tiefpaßverhalten des Farbensehens enthüllt. Wäre die Fouriertechnik eine umfassend gültige Beschreibung der Sehvorgänge, müßte sie insbesondere für die Verarbeitung nichtperiodischer Muster eine gewisse Vorhersagekraft aufweisen. In einer quantitativen Analyse nun zeigte Legge (1976), daß die Verarbeitung schmaler Leuchtdichte-Balken oder linienhafter Impulse nur noch durch ein erweitertes lineares Modell, welches auch das Phasenverhalten zur Beschreibung heranzieht, richtig wiedergegeben wird. Andererseits zeigte Legéndy (1975), daß Ergebnisse von Campbell und Robson (1968) mit einem rezeptiven Feldmodell, also ohne Fouriertechnik, richtig beschrieben werden können. Im Prinzip stellt auch das lineare Netzwerk von v. Seelen (1970) ein rezeptives Feldmodell dar. Die Koppelfunktionen des Netzwerkes nämlich sind die Charakteristiken der rezeptiven Felder.

Unserem Modell liegt die Annahme zugrunde, daß auf beiden Seiten der Trennkarte gleichartige rezeptive Felder liegen, die durch eine Differenzschaltung verbunden sind. Bei Einstellung auf Gleichheit der Testfelder muß die durch das Induktionsfeld - bei den Rechnungen wurde ein monochromatisches Feld mit λ = 550 nm verwendet - hervorgerufene Änderung durch Zugabe eines größeren Rotanteils kompensiert werden. Dann bleibt das Differenzsignal Null.

Als Koppelfunktionen (Abb. 20) sollen rezeptive Feldtypen dienen, welche außer einem räumlichen Antagonismus noch selektiv spektral empfindliche Gebiete aufweisen (vgl. Ingling und Drum, 1973).

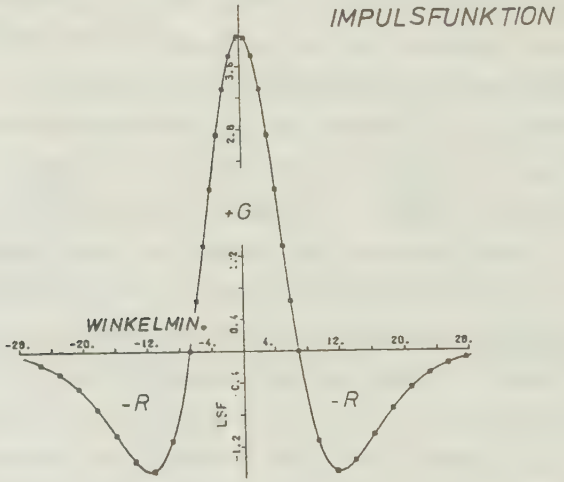


Abb. 20 Dargestellt ist hier mittels eines Computerprogrammes eine Linienimpulsreaktionsfunktion von 60 Minuten Breite, welche räumlich und spektral antagonistisch verknüpft ist. Während das Zentrum Signale von vornehmlich "grünempfindlichen Rezeptoren" erhält, sind die Umgebungen mit "Rotrezeptoren" verschaltet.

In der Abb. 20 beobachtet man Wechselwirkungen zwischen den "rot-" und "grün"-empfindlichen Rezeptoren "R" und "G". Spektral antagonistische Koppelfunktionen gibt es auch zwischen den "gelb"- und/oder "blauempfindlichen Rezeptoren", die man mit den Buchstaben "Y"=R+G und "B" bezeichnet.

Im folgenden soll kurz die Herleitung der von uns verwendeten Fundamentalempfindlichkeitsfunktionen $r_\lambda(x_\lambda, y_\lambda)$, $g_\lambda(x_\lambda, y_\lambda)$, $b_\lambda(x_\lambda, y_\lambda)$ nachvollzogen werden.

Die "R", "G" und "B" besitzen die spektral-unterschiedlichen Empfindlichkeiten R_λ, G_λ und B_λ, welche im normalsichtigen, trichromatischen Auge die Farbübertragung ermöglichen (Vos und Walraven, 1970). Insbesondere läßt sich jeder Farbeindruck unseres visuellen Farbenraumes aus dem System dieser drei Fundamentalgrößen erzeugen. Da die Farbmischgesetze im dreidimensionalen Farbraum linear sind, lassen sich die spektralen Empfindlichkeiten R_λ, G_λ und B_λ aus den CIE-Fundamentalempfindlichkeiten X_λ, Y_λ und Z_λ folgendermaßen herleiten:

$$\begin{pmatrix} R_\lambda \\ G_\lambda \\ B_\lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_\lambda \\ Y_\lambda \\ Z_\lambda \end{pmatrix}$$

Da man meistens die Größen $x_\lambda = \frac{X_\lambda}{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}$ und $y_\lambda = \frac{Y_\lambda}{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}$ anstelle der X_λ, Y_λ und Z_λ verwendet, bestimmt man nicht die Koeffizienten A_{ij}, sondern die Koeffizienten eines modifizierten Transformationsgesetzes. Hierzu dividiert man die obige Transformationsgleichung durch Y_λ und erhält mit den sogenannten relativen spektralen Empfindlichkeiten $r_\lambda = \frac{R_\lambda}{Y_\lambda}$, $g_\lambda = \frac{G_\lambda}{Y_\lambda}$ und $b_\lambda = \frac{B_\lambda}{Y_\lambda}$ die Matrixgleichung, welche nur noch x_λ und y_λ anstelle der X_λ, Y_λ und Z_λ enthält:

$$\begin{pmatrix} r_\lambda \\ g_\lambda \\ b_\lambda \end{pmatrix} = \frac{1}{Y_\lambda} \begin{pmatrix} A_{11} - A_{13} & A_{12} - A_{13} & A_{13} \\ A_{21} - A_{23} & A_{22} - A_{23} & A_{23} \\ A_{31} - A_{33} & A_{32} - A_{33} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\lambda \\ y_\lambda \\ 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{x_\lambda}{Y_\lambda} \\ 1 \\ \frac{1}{Y_\lambda} \end{pmatrix}$$

Die neun unbekannten Koeffizienten a_{ij} werden nach Vos und Walraven (1970) so bestimmt, daß die experimentell nachprüfbaren Farbmischgesetze des tri- und dichromatischen Farbensehens erfüllt sind. Beachtet man außerdem die experimentellen Befunde bezüglich der gerade unterscheidbaren Wellenlängen, des Bezold-Brücke-Effektes und der Stiles - Weber - Brüche, so hat man genügend Bedingungen, die Koeffizienten folgendermaßen zu bestimmen:

$$\begin{pmatrix} r_\lambda \\ g_\lambda \\ b_\lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.19112 & 0.57903 & -0.03596 \\ -0.18576 & 0.42633 & 0.03060 \\ -0.00536 & -0.00636 & 0.00536 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{x_\lambda}{y_\lambda} \\ 1 \\ \frac{1}{y_\lambda} \end{pmatrix}$$

Die Größen r: = r_λ , g: = g_λ und b: = b_λ hängen dabei mit den bei einer Leuchtdichte L in den Rot-, Grün- bzw. Blau-Kanälen absorbierten Quanten R, G bzw. B folgendermaßen zusammen: $r = \frac{R}{L}$, $g = \frac{G}{L}$, $b = \frac{B}{L}$

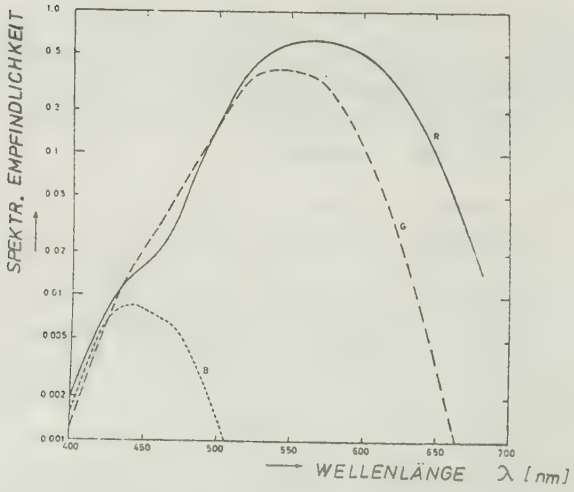


Abb. 21 Die in der Modellrechnung verwendeten Grundempfindlichkeitskurven, wie sie von Vos und Walraven (1970) bestimmt wurden.

Im Bereich niedriger Lichtintensitäten und bei im Vergleich zur Grundintensität niedrigen Intensitätsänderungen haben sich lineare Näherungen zur Beschreibung des visuellen Systems bewährt. Deshalb sollen nun Methoden der linearen Systemtheorie angewendet werden. Als Koppelfunktionen dienen dabei die Charakteristiken der rezeptiven Felder, welche nach üblicher Auffassung Impuls- oder Linienreaktionsfunktionen beschreiben. Allgemein läßt sich dann das Systemausgangssignal $u_2(\xi)$ aus dem Eingangssignal $u_1(\xi)$ -hier eines eindimensionalen Musters mit einer von ξ abhängigen örtlichen Verteilung - durch Faltung mit der Impulsreaktionsfunktion $s(\xi)$ gewinnen:

$$u_2(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\eta) \cdot u_1(\xi - \eta)\, d\eta$$

Das Eingangssignal soll ein Farbreiz der Intensität L und der korrespondierenden Wellenlänge 620 nm sein - entsprechend dem Testhalbfeld -, dem ein "Induktionsfeld" von 550 nm Wellenlänge überlagert wird. Die den Wellenlängen entsprechenden x-, y-Koordinaten des CIE-Farbdreiecks ergeben sich zu

(x;y) = (.68861 ; .31121) für 620 nm

und

(x;y) = (.30300 ; .69090) für 550 nm

Durch Überlagern des Induktionsfeldes tritt eine Intensitätsänderung ΔL auf, die unterschwellig sein soll, entsprechend dem de Vries-Rose Gesetz ($\Delta L \sim L^{1/2}$) soll also gelten: $\Delta L \leq a L^{1/2}$ mit $a \ll 1$.

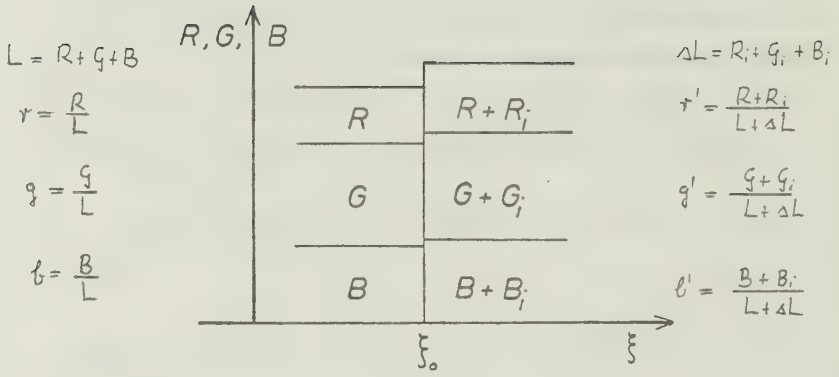


Abb. 22 Dargestellt sind die aus den Testfelddaten berechneten Quanten, welche in den R-, G-, B-Kanälen absorbiert wurden. ξ beschreibt die örtliche Verteilung des eindimensionalen Farbmusters. Die Induktionsfeldkante befindet sich bei ξ_0.

Nach Abb. 22 erhält man für jeden Farbkanal ein von der örtlichen Verteilung ξ abhängiges Eingangssignal, insgesamt also das vektorielle (farbdreidimensionale) Systemeingangssignal $\vec{u}_1(\xi)$:

$$u_1 := \vec{u}_1(\xi) = \begin{pmatrix} r(\xi) \\ g(\xi) \\ b(\xi) \end{pmatrix} \overset{(Abb.22)}{=\!=} \begin{cases} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} & \text{für } \xi < \xi_0 \\ \begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} & \text{für } \xi \geq \xi_0 \end{cases}$$

$$s(\xi) := \bar{\bar{s}}(\xi) = \begin{pmatrix} s_r(\xi) & 0 & 0 \\ 0 & s_g(\xi) & 0 \\ 0 & 0 & s_b(\xi) \end{pmatrix}$$

Für die Impulsfunktion der Abb. 20 lassen sich die Koeffizienten der "Impulsmatrix" $\vec{s}(\xi)$ leicht bestimmen. Dort ergibt sich die Impulsfunktion aus der Differenz $h(\xi)$ zweier Gaußscher Glockenkurven $h_1(\xi)$ und $h_2(\xi)$:

$$h(\xi) = h_1(\xi) - h_2(\xi) = \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] - \frac{1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]$$

Mit $\mu_1 = \mu_2 = 0$ gilt dann, wenn $\pm n_0 = \pm \sigma_1\sigma_2 \sqrt{\frac{2 \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}}$ die Nullstellen der Funktion $h_{(x)}$ sind:

$$s_r(\xi) = \begin{cases} h(\xi) & \text{für } -3\sigma_2 < \xi < -n_0 \text{ und } n_0 < \xi < 3\sigma_2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$s_g(\xi) = \begin{cases} h(\xi) & \text{für } |\xi| \leq n_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$s_b(\xi) = 0 \quad \text{für alle } \xi$$

Das Ergebnis dieser Rechnung ist in Abb. 23 mittels eines Computer-Zeichenprogrammes dargestellt. Die Zahlenangaben an der Ordinate bestimmen sich aus den den Rezeptorklassen (hier nur R,G) zugeordneten Flächenanteilen der Impuls(reaktions)funktion und den Rezeptoreingangsgrößen, wobei auf eine logarithmische Korrektur der letzteren verzichtet wurde. Bei fester Geometrie des rezeptiven Feldes geben diese Zahlen also das Verhältnis der Farbanteile (R,G) des Musters wieder. Die Höhe des Sprunges beschreibt die Änderung der Farbmischung.

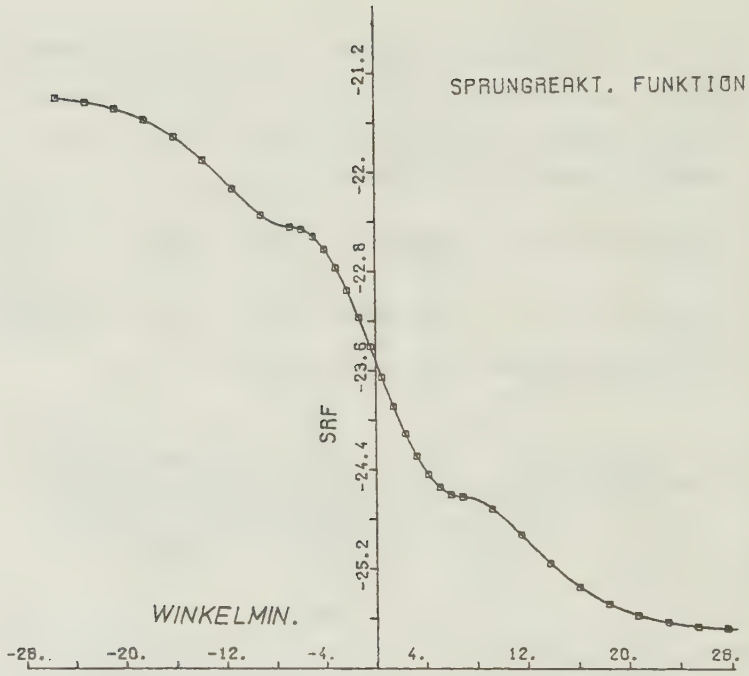


Abb. 23 Die Sprungreaktionsfunktion wie sie für die Konfiguration des rezeptiven Feldes aus Abb. 20 und für die in 5.3 beschriebene Farbkante berechnet wurde. Beschreibung der Ordinateneinheiten erfolgte im Text oben. Man erkennt, daß die Systemantwort nicht mit den durch Interpolation der experimentellen Ergebnisse gewonnenen Kurven (vgl. Abb. 7,9, 12 und 14) übereinstimmt.

Auffallend sind in Abb. 23 die Stufen an den Grenzen der spektral verschiedenen Feldanteile.

Diese Stufen treten im Systemausgangssignal nicht mehr auf, wenn die Eingangssignale mit den beiden gaußverteilten Summationskurven des R- und G-Systems gefaltet und erst anschließend voneinander subtrahiert werden (Abb.24a).

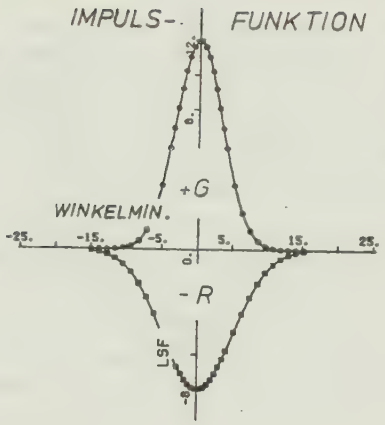


Abb. 24a Im Gegensatz zu Abb. 20 wird hier am "final combination point" dem Zentrumssignal (+G) das R-Umgebungssignal inhibitorisch (-R) überlagert. Breite des Summationsbereiches 30'.

Die Koeffizienten in der "Impulsmatrix" $\bar{\bar{s}}(\xi)$ nehmen in diesem Fall mit $\sigma = \max\{\sigma_1, \sigma_2\}$ folgende Form an:

$$s_7(\xi) = \begin{cases} h_2(\xi) & \text{für } -3\sigma \leq \xi \leq 3\sigma \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$s_9(\xi) = \begin{cases} h_1(\xi) & \text{für } -3\sigma \leq \xi \leq 3\sigma \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$s_6(\xi) = 0 \qquad \text{für alle } \xi$$

Es ergeben sich dann die sigmoiden Kurvenverläufe der Abb. 24 b/1/2.

Eine neurophysiologische Beschreibung eines so arbeitenden Systems müßte demnach berücksichtigen, daß die Inhibitionsreaktion erst nach vollständiger Summation innerhalb der einzelnen Zapfenkanäle erfolgt. Das würde mit den Befunden von Enroth-Cugell und Pinto (1970, 1972) übereinstimmen, nach denen am "final combination point", der retinalen

Ganglienzelle (der Katze), dem Umgebungssignal einfach das Zentrumssignal überlagert wird. Andererseits behandelten wir bislang nur eindimensionale Koppelfunktionen, also nur den vereinfachten Fall der rotationssymmetrischen zweidimensionalen Koppelfunktionen. Bei zweidimensionalen rezeptiven Feldern läßt sich jedoch zeigen, daß die Sprünge nicht auftreten. Das wiederum ist in Übereinstimmung mit der Bemerkung von Zsagar (1972), nach welcher die eindimensionale Betrachtung rotationssymmetrischer zweidimensionaler rezeptiver Felder zu anderen Ergebnissen führen kann.

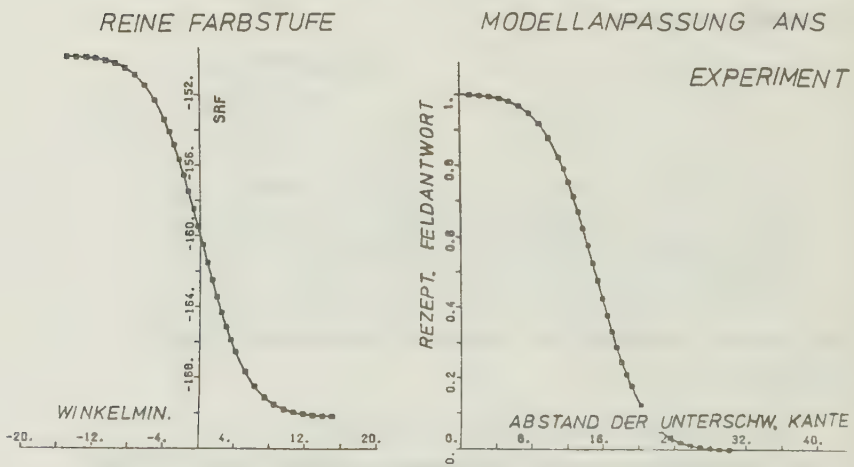


Abb. 24b/1/2 In Abb. 24 b/1 ist die Antwort des Systems 24a auf die Testreizkonfiguration der Abb. 22 dargestellt. (Beschreibung der Ordinateneinheiten auf S. 65) In Abb. 24 b/2 wurden diese Werte normiert und sind so mit den exp. Ergebnissen vergleichbar. Dabei zeigt sich jeodch, daß die durch Interpolation der experimentellen Befunde gewonnenen Kurven (vgl. Abb. 7,9, 12, 14) nicht diesen ausgeprägten sigmoiden Verlauf aufweisen.

Der Vergleich der Modellkurven mit den gemessenen Werten verdeutlicht, daß die ausgeprägte sigmoide Kurvenform doch nicht allzu gut mit den Experimentdaten übereinstimmt. Aus diesem Grunde wurden die relativen Flächenanteile der Rezeptorenklassen variiert und außerdem eine teilweise Überlagerung von rezeptiven Feldern herbeigeführt. Damit ließen sich keine überzeugenden Verbesserungen erzielen. Zum anderen beobachtet man farbcodierte und rotationssymmetrische rezeptive Felder im Geniculatum laterale und in retinalen Ganglienzellen. Da die Detektion von Kanten zwar noch zur "Vorverarbeitung" der Musteranalyse gehört (von Seelen, 1970), aber bereits "da zu sein scheint" (Hueckel, 1971), und damit ohne intellektuelle Leistung erfolgt, werden Farbkanten wohl in einer höheren Stufe, nämlich der Area 17, 18 oder 19, detektiert. Die Beteiligung der Simple-Cells, Complex- und Hypercomplex- Cells an der nicht farbcodierten Musterdetektion geben den neurophysiologischen Hinweis, daß auch der "Farbkantendetektor" in der Umgebung dieser Zellen lokalisiert ist. Die Modellbeschreibung wird dem Rechnung tragen müssen.

5.4 WIE DIE FARBKANTENDETEKTION MODELLMÄßIG BESCHRIEBEN WERDEN KANN

Ein biokybernetisches Modell muß stets die bereits bekannten grundlegenden experimentellen Befunde integrieren. Neurophysiologische Farbexperimente zwischen retinalen (Svaetichin , 1956) und corticalen Schichten stammen u.a. von Hubel und Wiesel (1959, 1968, 1969), die jedoch zumeist an extrafovealen Bezirken ableiteten. De Valois (1971) arbeitete vornehmlich mit Zellen aus dem Geniculatum laterale. Die Arbeiten von Daw (1968), Wagner, Mac Nichol und Wolbarsht (1963), u.a. sind weniger von Interesse, da sie nicht an Primaten vollzogen wurden, und demzufolge phylogenetisch nur bedingt vergleichbare Verhältnisse vorliegen. Dow und Gouras (1973) und Gouras (1972) entdeckten im fovealen gestreiften Cortex Zellen die entweder räumlich gegensätzlich oder gegensätzlich farbcodiert oder sowohl räumlich als auch farblich gegensätzlich codiert waren. Zum ersten Mal fanden Dow und Gouras (1973) auch beim Affen Neurone, deren rezeptive Felder sowohl räumlich als auch zweifach farblich gegencodiert waren. Zeki (1973) berichtet sogar von Neuronen, die optimal "feuerten", wenn deren rezeptive Felder mit monochromatischem Licht sich zeitlich ändernder Wellenlänge beleuchtet wurden. Bei dem Abgleich der beiden Testfelder dürften solche Neurone keine Rolle gespielt haben, da bei dem Kriterium der minimalen Kante im Feinabgleich die korrespondierenden Wellenlängen nur geringfügig verändert werden. Es ist nun die Frage zu klären, inwieweit experimentell nachgewiesene,gegencodierte Neurone die durch Induktion veränderte Einstellung zu erklären vermögen.

Die Abb. 25 a läßt den Schluß zu, daß ein einfaches räumlich - farblich gegencodiertes Neuron nicht auf alle Induktionsreize zu reagieren vermag. Stellt man sich nämlich auf den Standpunkt, daß der G-Bereich auch nur Signale der G-Rezeptoren erhält, so wird dieses Neuron zwar einen Induktionsreiz λ = 551 nm, nicht aber einen der Wellenlänge λ = 664 nm wahrnehmen und entsprechend wenig reagieren. Aber auch das Signal eines doppelt, also räumlich - farblich gegencodierten Neurons, Abb. 25 b, steht im Widerspruch zu den experimentellen Befunden. Auf ein Signal $+\Delta\lambda_G$ wird zwar $-\Delta\lambda_G$ eingestellt, damit aber $+\Delta\lambda_R$ zugemischt. Damit kann also kein Ausgleich erfolgen. Der Index bezeichnet dabei den Rezeptorkanal, dem ein spezifischer Reiz zugeführt (+) oder abgezogen (-) wird. Neuronale "Kantendetektoren" dieser Art dürften also vornehmlich zur Detektion überschwelliger Farbkanten dienlich sein. Nachdem die nur helligkeitscodierten Neurone infolge der experimentell ausgeglichenen Intensitätsstufen keine spezifischen Reize vorfinden, können wohl am besten die nur farblich gegencodierten Neurone die experimentellen Befunde erklären. Bei deren "Suchstrategie" nach kleinen Farbflächenunterschieden, einem Spezialfall der Farbmusterdetektion, werden im Bereich der erwarteten Farbkante die Signale aus den entsprechenden rezeptiven Feldern einzelner Rezeptorenkanäle gegeneinander abgewogen (inhibiert). Aus zwei benachbarten, sich einander inhibierenden Feldern wird dann entsprechend Abb. 25 c ein Differenzsignal gebildet (2- Neuronenmodell). Erst wenn dieses Differenzsignal deutlich von Null verschieden ist, zeigt auch ein Detektor, wie in Abb. 25 a beschrieben, ein deutliches Signal. Auf einen besonders die R-Rezeptoren erregenden

Induktionsreiz wird das Mischungsverhältnis entsprechend $+\Delta\lambda_G$ und damit $-\Delta\lambda_R$ eingestellt und damit das Differenzsignal entsprechend den Versuchen bei Null gehalten. Nach Zeki (1973) gibt es Kombinationen dieser Art zwischen allen Rezeptorenklassen.

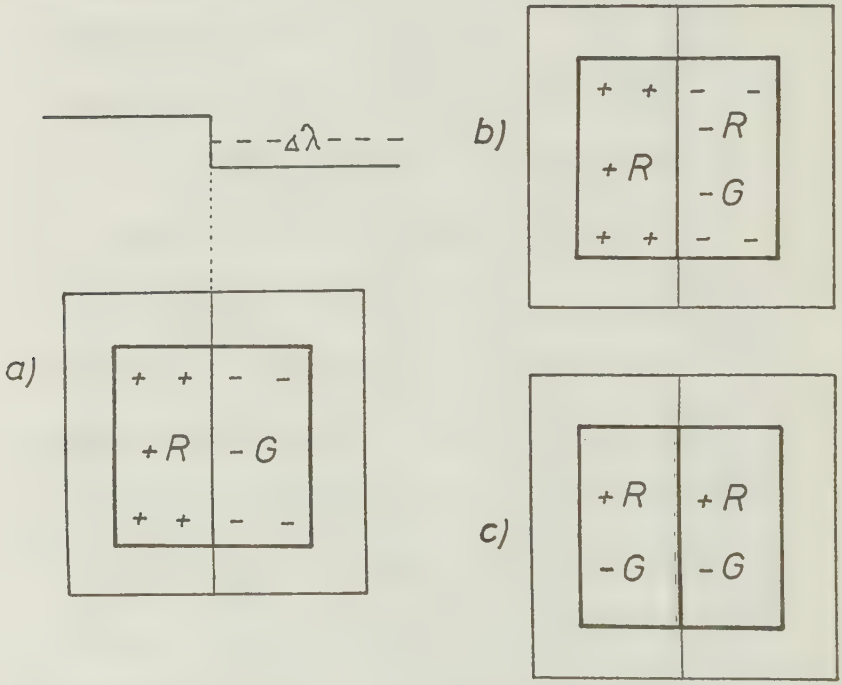


Abb. 25 a,b,c : In Abb. 25 a,b ist jeweils das rez. Feld eines Neurons in das Testfeld eingezeichnet. In Abb. 25 c) sind entlang der Kante zwei gleichartige rez. Felder dargestellt.

Das aus den bisherigen Überlegungen resultierende mathematische Modell soll eine möglichst allgemein gültige Beschreibung des transversal zu den Hirnschichten erfolgenden Informationsflusses ermöglichen. Die Grundüberlegung soll dabei sein, daß ein hierarchisch "höhergestelltes" Neuron die aus mehreren räumlich verteilten "untergeordneten" Neuronen kommende Information ent-

sprechend dem Informationsgehalt wichtet und summiert. Dieser Wichtungs- und anschließende Summationsprozeß kann gut mittels des Prinzips der Wahrscheinlichkeitssummation beschrieben werden. Zur Beschreibung der Versuchsergebnisse soll die Information vieler farb- und raumopponenter rotationssymmetrischer "Geniculatumszellen" wahrscheinlichkeitssummiert in eine "corticale Zelle" des "Simple-Typs" transformiert werden (vgl. Abb. 26a). Divergenzschaltungen lassen sich mittels des Prinzips der Wahrscheinlichkeitssummation beschreiben, indem die in verschiedenen Neuronen wahrscheinlichkeitssummierte Information durch "Interneurone" verknüpft wird (z.B. Abb. 26 b).

Es läßt sich die Wahrscheinlichkeitssummation folgendermaßen erklären:

Es sei ψ_i die Wahrscheinlichkeit, daß die i-te "Geniculatumszelle" eine überschwellige Erregung erfährt. Tragen N verschiedene "LGN-Zellen" völlig unabhängig voneinander dazu bei, ihre überschwelligen Erregungen in einer "Simple-Zelle" zu sammeln, so ist die Wahrscheinlichkeit ψ_{signal} der Signalanzeige in dieser Zelle durch die Funktion $1-\prod_{i=1}^{N}(1-\psi_i)$ gegeben. Nach Quick (1974) bestimmen sich die Wahrscheinlichkeiten ψ_i in Abhängigkeit der Zellantworten R_i einheitlich aus der folgenden psychometrischen Funktion:

$$\psi = 1 - 2^{-R_i^p}$$

wobei p ein Erfahrungswert ist. Die Wahrscheinlichkeit einer Signalanzeige ist dann:

$$\psi_{signal} = 1 - 2^{-\|\vec{R}\|^p}$$

wobei: $\|\vec{R}\| = \left(\sum_{i=1}^{N} R_i^p\right)^{1/p}$, die sogenannte p-Norm des Vektors $R = (R_1, \ldots, R_N)$, eine gewichtete Signalgröße ist.

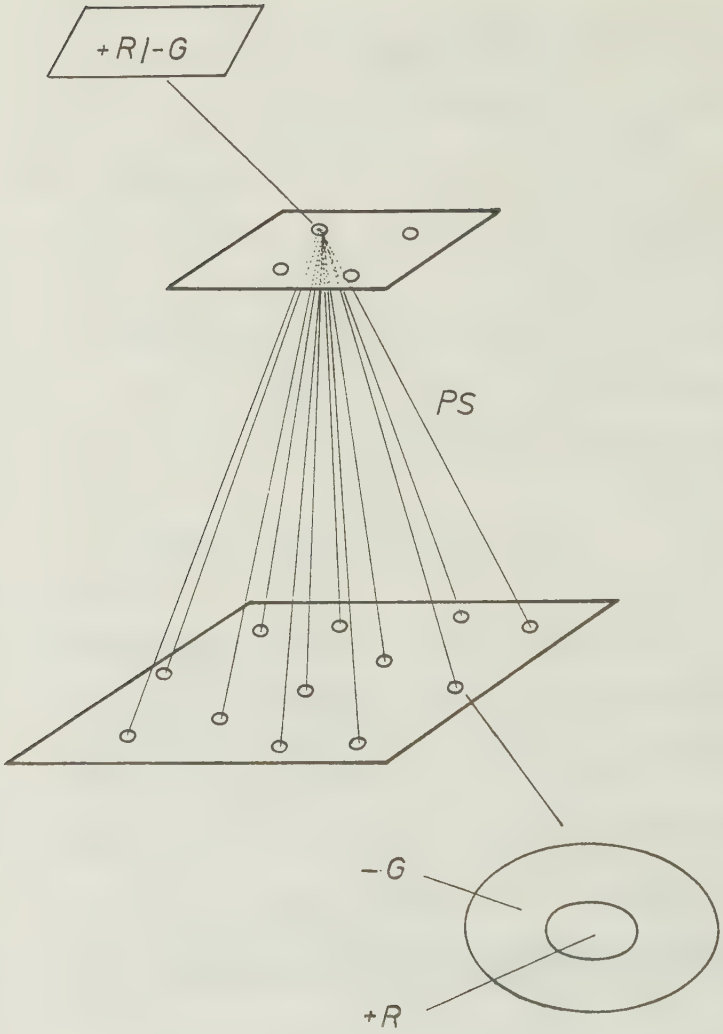


Abb. 26a Dargestellt sind hier schematisch zwei hierarchisch angeordnete und durch Wahrscheinlichkeitssummation verknüpfte neuronale Ebenen. Nach unseren Modellüberlegungen entsprechen diese am ehesten dem LGN und der Area 17. Das Größenverhältnis des rotationssymmetrischen und des rechteckförmigen rezeptiven Feldes ist natürlich - ebenso wie in Abb. 26 b - nicht maßstabsgetreu.

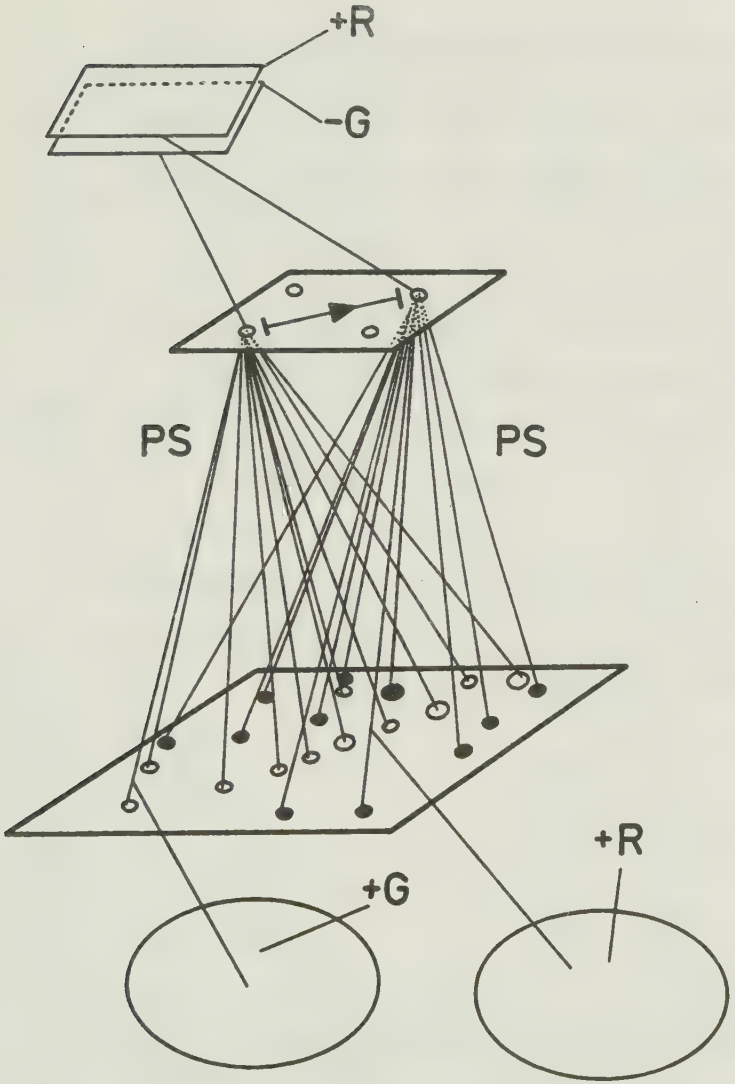


Abb. 26 b Hier werden R- und G-Signale getrennt wahrscheinlichkeitssummiert. Die schematisch eingezeichneten (+R)- und (+G)-rezeptiven Felder können durch spektral und räumlich gegensätzlich kodierte (+R-G)- und (+G-R)-Felder ersetzt werden, wenn man (physiologisch sinnvoll) vereinbart, daß nur die ON-Signale weiter verarbeitet werden. In "Area 17" wechselwirken die beiden "Divergenzsignale" mittels eines Interneurons.

Es wurden im folgenden zwei Möglichkeiten untersucht. Einmal wurden die Ausgänge der "LGN-Zellen" aus Abschnitt 5.3 wahrscheinlichkeitssummiert (Abb. 26a), das andere Mal wurden die Zellantworten von R-on-Zellen und G-on-Zellen getrennt wahrscheinlichkeitssummiert und dann durch ein Interneuron inhibitorisch verknüpft (Abb. 26 b). Ein rotes, grünes oder blaues rezeptives Feld mit dem Mittelpunkt x (Abb. 26a,b) soll folgende örtliche Empfindlichkeitsverteilung (Charakteristik) haben:

$$S_r(x,\xi) = 1/(\sigma_r\sqrt{2\pi})\ \exp\left[-(\xi-x)^2/2\sigma_r^2\right]$$

$$S_g(x,\xi) = 1/(\sigma_g\sqrt{2\pi})\ \exp\left[-(\xi-x)^2/2\sigma_g^2\right]$$

$$S_b(x,\xi) = 1/(\sigma_b\sqrt{2\pi})\ \exp\left[-(\xi-x)^2/2\sigma_b^2\right]$$

Eine Induktionskante an der Stelle ξ_0 erzeugt die in Abschnitt 5.3 und Abb. 22 ausführlich dargestellten Reizverteilungen:

$$r(\xi) = \begin{cases} r & \xi < \xi_0 \\ r' & \xi \geq \xi_0 \end{cases}$$

$$g(\xi) = \begin{cases} g & \xi < \xi_0 \\ g' & \xi \geq \xi_0 \end{cases}$$

$$b(\xi) = \begin{cases} b & \xi < \xi_0 \\ b' & \xi \geq \xi_0 \end{cases}$$

Wenn die Summation vom Rezeptiven(LGN-)Feld an der Stelle u bis zu dem an der Stelle σ gehen soll, dann gilt für den Signalvektor entsprechend Abb. 26a:

$$s_1 = \left\{ \sum_{x=u}^{\sigma} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \left[S_r(x,\xi)\cdot r(\xi) - S_g(x,\xi)\, g(\xi) \right] d\xi \right|^p \right\}^{1/p}$$

oder für die Abb. 26 b:

$$s_2 = \left\{ \sum_{x=u}^{\sigma} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} S_r(x,\xi)\cdot r(\xi)\, d\xi \right|^p \right\}^{1/p} - \left\{ \sum_{x=u}^{\sigma} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} S_g(x,\xi)\, g(\xi)\, d\xi \right|^p \right\}^{1/p}$$

Variiert werden in jedem der beiden Fälle die Größen der rezeptiven Felder. Die Parameter p werden meist zu p = 5 angenommen (vgl. z.B. Quick (1974)). Die Abstände zwischen den Mittelpunkten der rezeptiven Felder werden 2' gewählt, so daß eine beachtliche Überlappung der rezeptiven Felder auftritt. Je nach Versuchslauf wurden für σ_r und σ_g die Werte 3' und 2', 5' und 2' bzw. 7,5' und 3' probiert. Die Anzahl der berücksichtigten roten bzw. grünen Summationselemente lag zwischen 10 und 25. Die Summation in den rezeptiven Feldern erfolgt dabei nicht von $-\infty$ bis $+\infty$, sondern nur von $-3\sigma_{r,g,b}$ bis $+3\sigma_{r,g,b}$

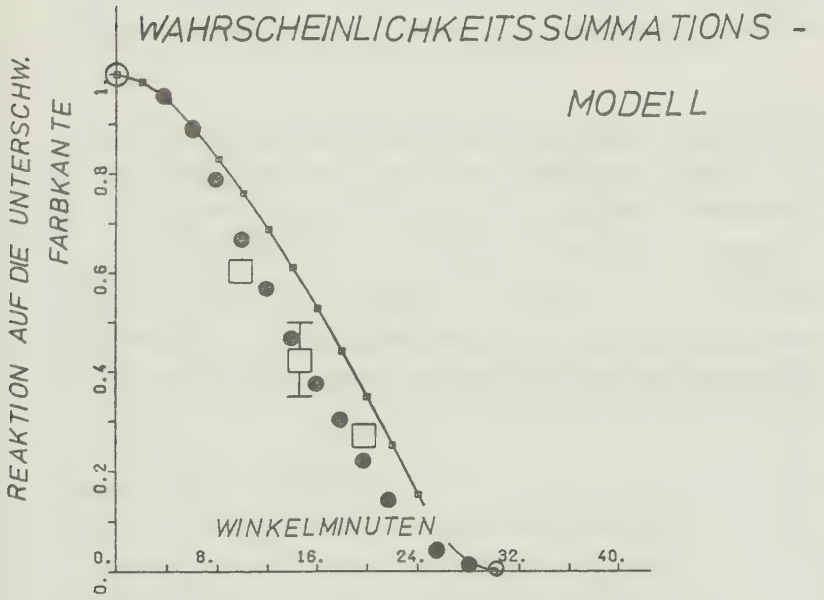


Abb. 27 Hier sind die Modellantworten mittels eines Computerprogrammes graphisch dargestellt. Die kleinen Quadrate mit der durchgezogenen Kurve entsprechen dem Ergebnis des Modells S_1, die nachträglich eingezeichneten Kreise dem Modell S_2. Die großen Quadate sind aus Abb. 14 entnommene Meßpunkte.

Abb. 27 zeigt, daß der Fall S_2 die Ergebnisse der Abb. 14 besser beschreibt. Diese Beobachtung läßt sich auch als Hinweis deuten, daß im ZNS nicht nur Summationen sondern auch ganz wesentlich "differentielle" Auswertungen der Neuronensignale erfolgen. Hier entsteht das Differenzsignal S_2 durch Vergleich eines Ensembles von Rotneurons mit einem Ensemble von Grünneurons. Die bei größerer Unterschwelligkeit gewonnenen Kurven (z.B. Abb. 13), entsprechen in ihrer Form aber mehr der Kurvenform aus dem Ansatz S_1. Andererseits ist der Unterschied zwischen den beiden Modellkurven der Ansätze S_1 und S_2 nicht sehr groß, so daß aus den bislang vorliegenden Daten weder S_1 noch S_2 ein eindeutiger Vorzug zu geben ist. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit sind sogar beide Fälle im ZNS realisiert.

Abschließend sei bemerkt, daß ein Modell, welches die Signale R_i der örtlich verteilten "LGN-Zellen" ohne Wahrscheinlichkeitssummation verknüpft, angewendet auf unsere Versuchsbedingungen, die Ergebnisse nur durch Geraden beschreibt. Betrachtet man modellmäßig ein Ensemble von Zellen, so tritt demnach die Wahrscheinlichkeitssummation als in guter Näherung hinreichende Bedingung für die Verknüpfungsfunktion der Zellen hinzu.

6. ABLEITUNG EINES NEURONALEN ZONENMODELLS DES FARBENSEHENS, DAS DIE ÖRTLICHE VERTEILUNG DER FARBMUSTER BERÜCKSICHTIGT

Die eine Möglichkeit biokybernetischer Modellbeschreibung besteht darin, experimentell bestätigte Prinzipien mathematisch möglichst allgemein zu beschreiben. Dieses Vorgehen wurde in Abschnitt 5 (insbesondere in 5.4) angewendet. Die andere Möglichkeit besteht darin, möglichst alle bekannten Einzeltatsachen zu erfassen und einer mathematischen Formulierung zu unterziehen. Diese Vorgehensweise soll nun in Abschnitt 6 geprobt werden.

Die in das Modell integrierten Beobachtungen sind dabei die Funktionsweisen eines einzelnen Farbrezeptors und die inhibitorischen bzw. exzitatorischen Wirkungen der die erste Querverbindung herstellenden Neuronen.

Da man allein schon wegen der schnell zunehmenden Kompliziertheit der Gleichungssysteme nicht alle Neurons der Sehbahn und des visuellen Cortex in die Beschreibung aufnehmen kann, beschränkt man sich also auf die peripherstenGebiete der visuellen Datenverarbeitung. Versuche, dabei insbesondere die Anfangsgründe des Farbensehens zu erforschen, wurden oftmals und von den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen aus unternommen.

Bedeutende physiologische Beiträge stammen vom Helmholtz, der drei Farbrezeptormechanismen postulierte, und von Hering, der drei bzw. vier Grundmechanismen bzw. -rezeptoren zu Gegenfarbenpaaren kombinierte. Die Helm-

holtzschen Rezeptoren wurden durch physiko-chemische Arbeiten von Wald (1963,1964), die Heringsche Gegenfarbentheorie z. B. durch neurophysiologische Arbeiten von de Valois (1966, 1972) bestätigt. Im wesentlichen quantitativ erweitert wurden die Helmholtz-Heringschen Arbeiten von Vos und Walraven (1972), die mit dem Zonenmodell des Farbensehens aber immerhin das Farbenunterscheidungsvermögen, den Bezold-Brücke-Effekt und den Stiles-Crawford-Effekt der Farbtonverschiebung erklären konnten. Beiträge zum Aufdecken der Wirkungsmechanismen von physikalischer Seite aus stammen von Röhler (1965), der die Methode der spezifischen Quantenzahl in den Farbrezeptormechanismen begründete. Mit dieser Methode lassen sich beispielsweise die Verwechslungsgeraden als physiologisches Korrelat ableiten. Biologische Ansätze stammen beispielsweise von Hassenstein (1968). All diesen Modellen gemeinsam ist, daß die zu untersuchenden oder zu vergleichenden Farbreize gerade eine retinale Summationseinheit ausfüllen. Die Farbverarbeitung wird also als Einkanal- bzw. Dreikanalproblem behandelt. Aus diesem Grund eignen sich die Modellvorstellungen nur sehr beschränkt zur Farbmusterverarbeitung. Hierzu geeignet wären Methoden, welche Wechselwirkungen zwischen parallelen Farbkanälen berücksichtigen. Zur Erklärung experimenteller Befunde wurden zwar wiederholt parallele Farbkanäle gefordert, z.B. Campbell und Robson (1968), Quick und Reichert (1973), Sachs, Nachmias und Robson (1971), allerdings fehlt bis jetzt ein konsequenter Ausbau dieser Theorie.

Andererseits gibt es eine Reihe von Arbeiten, die versuchen, die Gesetzmäßigkeiten neuronaler Netzwerke mathematisch zu

beschreiben. Erwähnt seien nur Beiträge von Beurle (1957) und Griffith (1963). So zeigte z.B. Griffith in seiner "Feldtheorie" der neuronalen Netze, daß die Stärke der räumlichen Verknüpfung der Neuronen im wesentlichen exponentiell mit dem Abstand abnehmen muß, wenn die Feldgleichungen isotrop und von zweiter Ordnung sein sollen. Demgegenüber beschreibt Röhler (1976) die Ausbreitung neuronaler Erregung (am Beispiel des visuellen Systems) in einem als anisotrop angenommenen Medium durch eine modifizierte Wärmeleitungsgleichung. Damit läßt sich u.a. die zeitlich-örtliche Übertragungscharakteristik für unbunte Gitter herleiten. Im Gegensatz hierzu versuche ich, Befunde aus der Neuroanatomie der Retina (Dubin, 1974) mit der mathematischen Theorie der Nervennetze (insbesondere des Cortex und Thalamus) von Wilson und Cowan zu verknüpfen. Es zeigt sich, daß man die Eingangssignale der drei Rezeptorklassen nicht ohne weiteres als die Anfangs- und Randwerte der Wilson-Cowan-Gleichungen annehmen darf. Vielmehr muß man die Einteilung der Neuronen in exzitatorisch und inhibitorisch wirkende verlassen und drei Klassen von Neuronen, R-,G-, B-Neurone genannt, betrachten, die geeignet exzitatorisch und inhibitorisch verknüpft sind.

Nach Ableitung der Gleichungen wird das räumlich-zeitliche Einschwingverhalten eines R-G-Neuronennetzwerkes für ein reines R-Signal berechnet, welches man sich als kurzzeitig dargebotenen Farb- oder Induktionsbalken vorstellen kann. Außerdem wird gezeigt, daß sich eine Erregung der R-Rezeptoren im R-G-Kanal bei geeigneter Parameterwahl lateral fortpflanzt.

6.1 BEMERKUNGEN ZUR ABLEITUNG DER GLEICHUNGEN

Die Information in dem visuell-neurologischen System wird von der Rezeptorebene über thalamische Bezirke bis in corticale Bereiche stets über eine diskrete und endliche Menge von Neuronen geleitet. Eine einfache Möglichkeit, eine so große Anzahl von Elementen modellmäßig zu behandeln, ist - abgesehen von statistischen Methoden - das Ersetzen der diskreten Verteilung durch eine kontinuierliche. In diesem Punkt soll an die mathematische Netzwerktheorie von Wilson und Cowan (1973) angeknüpft werden. Allerdings ist es nicht möglich, drei kontinuierliche Schichten von Rezeptoren als Anfangs- bzw. Randwertproblem für die in seinem Netzwerk entweder exzitatorisch oder inhibitorisch agierenden Zellen zu betrachten.

Zum einen nämlich müßte man in einem solchen Fall Vereinbarungen treffen, welche Rezeptorarten mit den exzitatorischen bzw. welche mit den inhibitorischen Zellen im Sinne Wilson und Cowans (1973) zu identifizieren sind. Sowohl eine feste Verknüpfung als auch eine von dem dargebotenen Muster abhängige Verknüpfung bedeutet aber eine unphysiologische Annahme.

Zum anderen müßte es unter diesen Verhältnissen Punkte (entsprechend Neuronen) im Netzwerk geben, welche sich je nach vorgegebenem Farbmuster sowohl wie Rot-, Grün- oder Blauneurone verhalten würden. Das steht natürlich im Widerspruch zu elektrophysiologischen Erfahrungen, wonach es beispielsweise "trichromatische Zellen" gibt,

aber keine Zellen, die sich einmal wie trichromatische Neuronen,dann aber wie dichromatische Neurons verhalten.

Ein R-on/ G-off-Neuron kann sich auch nicht plötzlich wie ein Y-on/B-off-Neuron verhalten.

Man behilft sich, indem man drei kontinuierlich verteilte verschiedene Neuronentypen definiert, welche die sogenannten R-, G- und B-Kanäle aufbauen. Der Anfangszustand der einzelnen Kanäle wird durch das entsprechende Rezeptorenausgangssignal (Generatorpotential) bestimmt. Die kontinuierlich verteilten R-Rezeptoren z.B. bilden aber nicht allein das Eingangssignal des R-Kanals. Die einzelnen Rezeptorzellen sollen vielmehr mit den Farbkanälen so wechselwirken, wie dies physiologisch möglich ist, also exzitatorisch oder inhibitorisch (vgl. Abb.28). Der Vorteil dieses Vorgehens ist, daß die Neurons der einzelnen Kanäle ihre Identität nicht vergessen, was wiederum mit der Bemerkung in 5.1 übereinstimmt, nach welcher alle Neuronen eine bestimmte selektive Empfindlichkeit aufweisen. Wenn die neurophysiologischen Daten über Neuronen- und Verknüpfungsaktivitäten auch weitgehend mit den von Wilson und Cowan (1972, 1973) angegebenen Werten übereinstimmen, ist ein ganz wesentlicher Unterschied beider Modelle, daß es bei Wilson und Cowan (1973) nur exzitatorisch oder inhibitorisch aktive Neuronen gibt, während in dem erweiterten Farbmodell drei Neuronenarten R,G, B je nach Verknüpfung inhibitorisch und exzitatorisch wirken.

Das Modell von Wilson und Cowan ergibt sich also unter den folgenden Einschränkungen aus dem neuronalen Farbmodell. Man beschränkt sich auf zwei Neuronenarten. Jedes Neuron

kann zwar auch mit jedem benachbarten Neuron verknüpft sein, jedes Neuron ist jedoch nur entweder exzitatorisch oder inhibitorisch verknüpfbar.

In Anlehnung an Wilson und Cowan (1973) aber soll die Aktivität z.B. R (x,t) am Ort x zur Zeit t im R-Kanal, gleich dem Anteil der Neuronen sein, die im R-Kanal an dieser Stelle und zu dieser Zeit aktiv sind. Mit der Flächendichte ϱ_R ergibt sich also beim eindimensionalen Netzwerk die Anzahl der aktiven Neuronen im Bereich dx des R-Kanals im Zeitintervall dt zu $\varrho_R R\,(x,t)\,dx\,dt$.

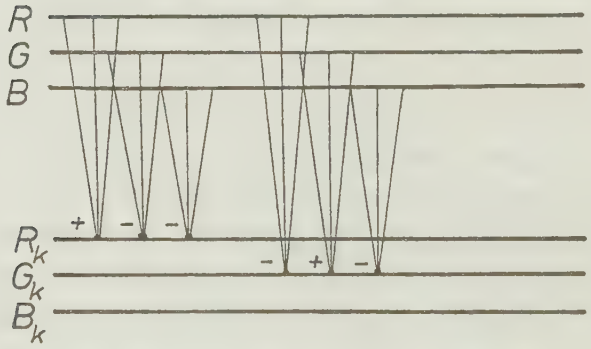


Abb. 28 R,G,B bezeichnen hier die kontinuierlich angenommenen Schichten der R-,G-,B-Rezeptoren, R_k, G_k, B_k entsprechend die kontinuierlichen Schichten des 1. Neurons. Analog erhält auch der B_k-Kanal exzitatorische Signale aus der B-Schicht, inhibitorische Signale aus den R- und G-Schichten. Bei den numerischen Untersuchungen beschränkte man sich jedoch auf den dichromatischen Fall des R-G-Sehens.

6.2 ABLEITUNG DER GLEICHUNGEN

Seien also ϱ_R, ϱ_G, ϱ_B die Flächendichten der Neuronen der R-, G-, B-Kanäle.

R (x,t), G (x,t), B (x,t) seien die Anteile der am Ort x im Augenblick t aktiven Neurons in den R-, G-, B-Kanälen.

$\hat{R}$ (x,t), $\hat{G}$ (x,t), $\hat{B}$ (x,t) sind die auf die R-, G-, B-Neurons auftreffenden afferenten Erregungen, z. B. die R-, G-, B-Rezeptorsignale.

$v_R = v_G = v_B = v$ sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Aktionspotentiale.

$\beta_{PQ}(d)$ mit $Q \in \{R,G,B\}$ und $P \in \{R,G,B\}$ geben die Wahrscheinlichkeiten an, mit der Neuronen des Typs Q mit Neuronen des Typs P im Abstand d verknüpft sind.

β_{PQ} sollen als Verknüpfungsfaktoren bezeichnet werden.

Der bei Wilson und Cowan nicht auftretende Verknüpfungsfaktor $\sigma_{PQ} \in \{+1,-1\}$ ist +1 bei exzitatorischer Verknüpfung und -1 bei inhibitorischer Verknüpfung zwischen Neuronenarten P und Q.

Mit den Verknüpfungsfaktoren und Verknüpfungswahrscheinlichkeiten gelingt es, die mittlere Anzahl IR(x,t), IG(x,t) bzw. IB(x,t) der am Ort x und im Augenblick t auf den R-, G- bzw. B-Kanal auftreffenden Impulse pro Zeiteinheit in Matrixform anzugeben. Da man sich auf ein eindimensional

ausgedehntes Netzwerk beschränkt, sollen die bei x ankommenden Impulse der Beitrag eines am Ort X befindlichen Neuronenbezirkes der Ausdehnung dX sein.

Also: $$\begin{pmatrix} IR \\ IG \\ IB \end{pmatrix} = \overline{\overline{M}} \cdot \begin{pmatrix} \varrho_R \cdot R \\ \varrho_G \cdot G \\ \varrho_B \cdot B \end{pmatrix} \cdot dX$$

mit:

$$\overline{\overline{M}} = \begin{pmatrix} \sigma_{RR} \cdot \beta_{RR}(x-X) & \sigma_{GR} \cdot \beta_{GR}(x-X) & \sigma_{BR} \cdot \beta_{BR}(x-X) \\ \sigma_{RG} \cdot \beta_{RG}(x-X) & \sigma_{GG} \cdot \beta_{GG}(x-X) & \sigma_{BG} \cdot \beta_{BG}(x-X) \\ \sigma_{RB} \cdot \beta_{RB}(x-X) & \sigma_{GB} \cdot \beta_{GB}(x-X) & \sigma_{BB} \cdot \beta_{BB}(x-X) \end{pmatrix}$$

und: $$\begin{pmatrix} \varrho_R \cdot R \\ \varrho_G \cdot G \\ \varrho_B \cdot B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varrho_R \cdot R(X, t - \frac{x-X}{v}) \\ \varrho_G \cdot G(X, t - \frac{x-X}{v}) \\ \varrho_B \cdot B(X, t - \frac{x-X}{v}) \end{pmatrix}$$

In folgenden Abschnitten sei

$$\sigma_{PQ} = \begin{cases} +1 & \text{für } P = Q \\ -1 & \text{für } P \neq Q \end{cases}$$

d.h. also, daß z.B. die G-, B-, Kanäle inhibitorisch auf den R-Kanal entweder direkt oder indirekt (durch angenommene Interneurone) wirken. Die Signale der R-,G-, B-Kanäle werden auf den nächsten anatomischen Bezirk projiziert. Die Reaktion des postsynaptischen Potentials (p.s.p.) auf einen ankommenden Einzelimpuls (spike) ist eine Konstante des Neurons und soll in realistischer Näherung durch $\alpha \cdot \exp(-\frac{t}{\mu})$

beschrieben werden. Dabei sind α die maximale Amplitude des Membranpotentials, μ eine Membranzeitkonstante.

Damit folgt für die integrale Erregung der Kanäle unter Annahme linearer räumlicher und zeitlicher Summation und mit den auf S. 85 erläuterten afferenten Signalen:

$$\begin{pmatrix} \widehat{IR} \\ \widehat{IG} \\ \widehat{IB} \end{pmatrix} = \int_{-\infty}^{t} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbb{M} \begin{pmatrix} \varrho_R \cdot R + \widehat{R} \\ \varrho_G \cdot G + \widehat{G} \\ \varrho_B \cdot B + \widehat{B} \end{pmatrix} dX \right\} \alpha(t-T)\, dT$$

Analog zu Wilson und Cowan (1973) werden die Refraktärzeiten r_R, r_G, r_B berücksichtigt. Danach sind nur die Neuronen $\widehat{IR}_{r_R}$ usw. des Netzwerkelementes δx bei x ansprechbar, die $(t-r_R)$ Zeiteinheiten vor dem Zeitpunkt nicht überschwellig erregt wurden:

$$\left.\begin{aligned} {}^{R}_{r_R}(x,t) &= \widehat{IR}_{r_R} = \left(1 - \int_{t-r_R}^{t} R(x,T)\, dT\right) \cdot \varrho_R \cdot \delta x \\ {}^{G}_{r_G}(x,t) &= \widehat{IG}_{r_G} = \left(1 - \int_{t-r_G}^{t} G(x,T)\, dT\right) \cdot \varrho_G \cdot \delta x \\ {}^{B}_{r_B}(x,t) &= \widehat{IB}_{r_B} = \left(1 - \int_{t-r_B}^{t} B(x,T)\, dT\right) \cdot \varrho_B \cdot \delta x \end{aligned}\right\} \begin{array}{l} mit \\ r_R = r_G = r_B = \\ = r \end{array}$$

Außerdem wurde eine Schwellenfunktion definiert, welche angibt, bei wievielen Neuronen S_r, S_G, S_B in den R-, G-, B-Kanälen bei einer mittleren integralen Kanalaktivität $\widehat{IR}$, $\widehat{IG}$, $\widehat{IB}$ zumindest die Schwellenenergie pro Zeiteinheit erreicht wird.

$$S_R(\widehat{IR}) := \frac{1}{1 + \exp\left[-\gamma_R(\widehat{IR} - \Theta_R)\right]} - \frac{1}{1 + e^{\gamma_R \Theta_R}}$$

$$S_G(\widehat{IG}) := \frac{1}{1 + \exp\left[-\gamma_G(\widehat{IG} - \Theta_G)\right]} - \frac{1}{1 + e^{\gamma_G \Theta_G}}$$

$$S_B(\widehat{IB}) := \frac{1}{1 + \exp\left[-\gamma_B(\widehat{IB} - \Theta_B)\right]} - \frac{1}{1 + e^{\gamma_B \Theta_B}}$$

Ist die Anzahl der Neurone in den Kanälen, die im Zeitintervall δt zum Zeitpunkt t zumindest die Schwelle überschreiten, statistisch unabhängig von der Anzahl der Neurone, welche erregbar sind, dann ergibt sich die Zahl der Neuronen, die im Intervall δt zum Zeitpunkt $t+\tau$ erregt werden zu:

$$\left.\begin{aligned} R\ (x,t+\tau)\ \varrho_R\ \delta x\ \delta t &= R(x,t)\cdot S_R(\widehat{IR})\ \delta t \\ G\ (x,t+\tau)\ \varrho_G\ \delta x\ \delta t &= G(x,t)\cdot S_G(\widehat{IG})\ \delta t \\ B\ (x,t+\tau)\ \varrho_B\ \delta x\ \delta t &= B(x,t)\cdot S_B(\widehat{IB})\ \delta t \end{aligned}\right\} (*)$$

An dem Gleichungssystem (*) werden die von Wilson und Cowan angegebenen Näherungen vorgenommen.

Wenn die laterale Wechselwirkung von geringer Reichweite ist, was bei genügend großer Fortpflanzungsgeschwindigkeit v der Aktionspotentiale stets der Fall ist, werden die Ausdrücke $\left|\frac{x-X}{v}\right|$ vernachlässigbar.

In den Ausdrücken $\widehat{IR}$, $\widehat{IG}$, $\widehat{IB}$ vertauscht man die Integrationsreihenfolge (Satz von Fubini) und definiert folgende Zeitmittelwerte:

$$\langle R(x,t)\rangle := \frac{1}{\mu}\int_{-\infty}^{t} R(x,T)\exp\left(-\frac{t-T}{\mu}\right)dT$$

$$\langle G(x,t)\rangle := \frac{1}{\mu}\int_{-\infty}^{t} G(x,T)\exp\left(-\frac{t-T}{\mu}\right)dT$$

$$\langle B(x,t)\rangle := \frac{1}{\mu}\int_{-\infty}^{t} B(x,T)\exp\left(-\frac{t-T}{\mu}\right)dT$$

Es gelten dann die folgenden Beziehungen:

$$R(x,t) = \mu\frac{\partial}{\partial t}\langle R(x,t)\rangle + \langle R(x,t)\rangle$$

$$G(x,t) = \mu\frac{\partial}{\partial t}\langle G(x,t)\rangle + \langle G(x,t)\rangle$$

$$B(x,t) = \mu\frac{\partial}{\partial t}\langle B(x,t)\rangle + \langle B(x,t)\rangle$$

Der Mittelwertsatz der Integralrechnung und die Näherungen $\langle R(x,t)\rangle \approx \langle R(x,t-\tau)\rangle$, analog für $\langle G(x,t)\rangle$ und $\langle B(x,t)\rangle$ führen zu dem Ergebnis:

$$\int_{t-\tau}^{t} R(x,T)\,dT = \int_{t-\tau}^{t} \left\{ \mu \frac{\partial}{\partial t} \langle R(x,T)\rangle + \langle R(x,T)\rangle \right\} dT \approx \tau \cdot \langle R(x,t)\rangle$$

Analoge Ergebnisse für

$$G(x,t) \quad \text{und} \quad B(x,t)$$

Ebenso gilt mit $\tau \ll \mu$:

$$R(x,t+\tau)\,\delta t \approx \left\{ \mu \frac{\partial}{\partial t} \langle R(x,t)\rangle + \langle R(x,t)\rangle \right\} \delta t$$

$$G(x,t+\tau)\,\delta t \approx \left\{ \mu \frac{\partial}{\partial t} \langle G(x,t)\rangle + \langle G(x,t)\rangle \right\} \delta t$$

$$B(x,t+\tau)\,\delta t \approx \left\{ \mu \frac{\partial}{\partial t} \langle B(x,t)\rangle + \langle B(x,t)\rangle \right\} \delta t$$

Mit diesen Näherungen gelangt man zu folgendem partiellem Integrodifferentialgleichungssystem für die unbekannten Funktionen $\langle R(x,t)\rangle, \langle G(x,t)\rangle, \langle B(x,t)\rangle$:

$$(**) \quad \begin{cases} \mu \frac{\partial}{\partial t} \langle R(x,t)\rangle = -\langle R(x,t)\rangle + \left[1 - \tau \langle R(x,t)\rangle\right] \cdot S_R(A) \\ \mu \frac{\partial}{\partial t} \langle G(x,t)\rangle = -\langle G(x,t)\rangle + \left[1 - \tau \langle G(x,t)\rangle\right] \cdot S_G(B) \\ \mu \frac{\partial}{\partial t} \langle B(x,t)\rangle = -\langle B(x,t)\rangle + \left[1 - \tau \langle B(x,t)\rangle\right] \cdot S_B(C) \end{cases}$$

mit den Schwellenfunktionen S_R, S_G, S_B und den Abkürzungen für:

$$A = \alpha\mu \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \sigma_{RR} \beta_{RR}(x-X) \langle R(X,t)\rangle + \sigma_{GR} \beta_{GR}(x-X) \langle G(X,t)\rangle + \right.$$
$$\left. + \sigma_{BR} \beta_{BR}(x-X) \langle B(X,t)\rangle \right\} dX + \alpha\mu \hat{R}(x,t)$$

und analog für B und C.

6.3 NUMERISCHE LÖSUNG DES PARTIELLEN INTEGRO-DIFFERENTIALGLEICHUNGSSYSTEMS

Die Gleichungen (✳ ✳) bilden ein partielles Integrodifferentialgleichungssystem erster Ordnung, das für das Anfangs- und Randwertproblem numerisch gelöst werden soll. Die Kanalaktivitäten des Netzwerkes sind also zum Zeitpunkt t = O an allen Stellen x des Netzwerkes gleich Null. Zum Zeitpunkt t = O sollen dann die Rezeptorsignale R, G, B mit einer beliebigen örtlichen Verteilung, entsprechend den vorgegebenen Farbmustern,und für eine bestimmte Zeit, entsprechend der Darbietungszeit des Musters einsetzen. Die Rezeptorsignale ergeben sich durch Logarithmieren des Produktes aus der sprektralen Verteilung des Farbmusters und den Rezeptorfundamentalempfindlichkeitskurven.

Da es keine Prozeduren für das Lösen eines partiellen Integrodifferentialgleichungssystems gab, andererseits nur Differentiationen nach der Zeit auftreten, konnte man sich des folgenden Näherungsverfahrens bedienen. Man löste das Anfangswertproblem des Systems bezüglich der Zeit für verschiedene (natürlich möglichst viele) Punkte x des Netzwerkes. Es gilt $\langle R(x,0)\rangle = \langle G(x,0)\rangle = \langle B(x,0)\rangle = 0$ für alle x des Netzwerkes. Man betrachtet x also als Parameter.

Für jeden Iterationsschritt bezüglich der Zeit setzt man die Werte für $< R(x,t) >$, $< G(x,t) >$, $< B(x,t) >$ stetig bezüglich x entsprechend dem vorhergehenden Iterationswert fort. Hierzu bedient man sich der Aitken-Interpolation. Diese stetigen Fortsetzungen werden dann in Unterprogrammen integriert und zur Bestimmung des nächsten Zeititerationsschrittes herangezogen. Voraussetzung ist dabei, daß man die Schrittweite Δt für die Zeititeration zu der Zeit t in einer Subroutine (für das Lösen des gewöhnlichen Differentialgleichungssystems erster Ordnung) vom Hauptprogramm aus so klein wählt, daß man für alle Parameter x auch tatsächlich bis zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ gelangt.
Schließlich bilden die Werte

$$< R(x, t+\Delta t) > , < G(x,t+\Delta t) >, < B(x,t+\Delta t) >$$

ja wieder die neuen Anfangswerte im nächsten Iterationsschritt. Dieses Näherungsverfahren konvergiert natürlich um so besser, je dichter die Parameterwerte x und je kleiner die Zeititerationsschritte gewählt werden. Eigentlich müßte man bei Konvergenz dieser Methode auch noch die Kompatibilität der Lösung zeigen. Darauf soll verzichtet werden, da sich mit der Näherungslösung recht brauchbare Werte ergaben. Die Anzahl der Parameterwerte x wird ebenso wie die Iterationsschrittweite Δt beschränkt durch die langen Rechenzeiten (TR 440).

6.4 BEISPIELE FÜR DEN SONDERFALL DES DICHROMATISCHEN SEHENS

Im Fall einer Beschränkung auf die dichromatische Form des Farbensehens, also auf zwei der drei möglichen Kanäle, wurde die zeitliche Summation für einen speziell die Rotrezeptoren erregenden balkenförmigen und 400µm breiten Reiz untersucht (1µm Länge auf der Retina entsprechen einem ca. 0,002 Grad großem rechteckförmigen Reiz im Gesichtsfeld).

Zunächst wurde der Verlauf des Signales im Mittelpunkt des rechteckförmigen Reizes untersucht. Mit der Darbietungsdauer des Reizes steigt auch die Kanalerregung an. Ab einer gewissen Schwelle, die bei einer Darbietungsdauer des Musters von etwa 4µsec. erreicht wird, steigt die Aktivität des R-Kanals auch nach Abschalten des roten Balkenreizes weiter an, um schließlich wieder abzufallen. Dieses Verhalten des Netzwerkes bei diesen Parametern entspricht dem aktiven Übergangsverhalten (active transient) und ist in Abb. 29 dargestellt.

In einem weiteren Beispiel wurde untersucht, wie im active-transient-Fall das R-G-Netzwerk auf einen Balkenreiz, welcher nur für 5µsec und auch nur auf die R-Rezeptoren wirkt, im räumlichen Verlauf reagiert. Dabei ist zunächst zu beobachten, daß beim Abklingen der Kanalerregung (zum Zeitpunkt t_2 und t_3) ein leichtes Überschwingen zu beobachten ist. Anschließend beobachtet man ein negatives Überschwingen des R-G-Signals und ein gleichzeitiges Wegwandern der Kanalerregung von dem ursprünglich erregten Neuronenbezirk. Bildlich beschrieben teilt der primär gereizte Neuronenbezirk dem

Nachbargebiet also mit, daß etwas passiert ist. Daß diese Mitteilung in größerem Abstand inhibitorischer Natur wird, könnte dazu dienen, "Streulicht" oder allgemeiner Rauschen nicht zu verstärken.

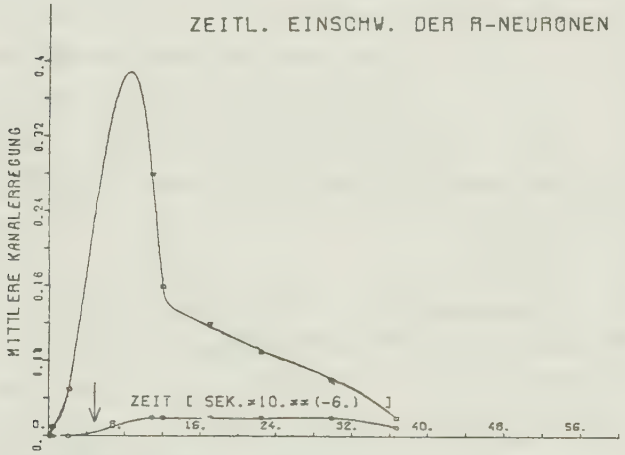
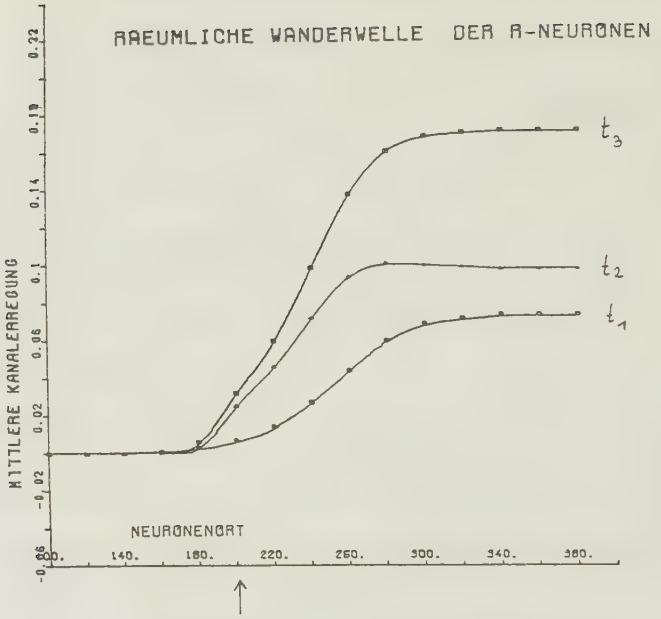
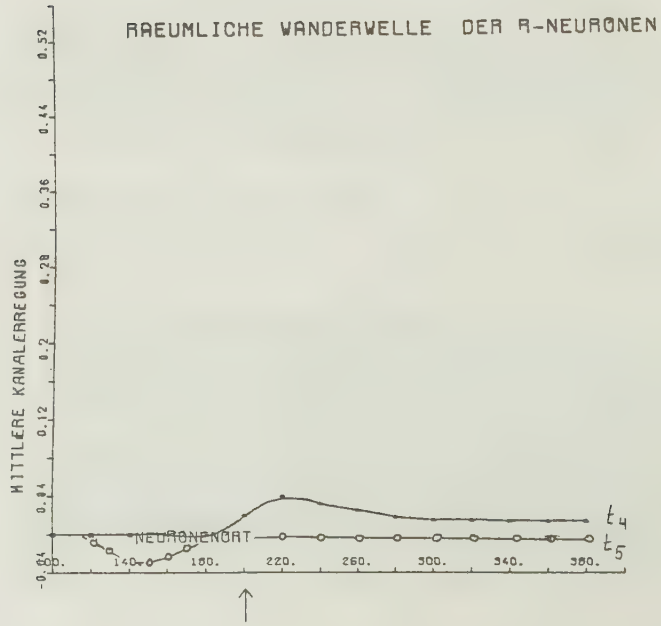


Abb. 29 Durch die Kreissymbole dargestellt ist die auch bei selektiver Reizung der R-Rezeptoren zu beobachtende minimale Erregung in der G_k-Schicht. Die Quadrate geben den Verlauf der Erregung in der R_k-Schicht an. Zu beobachten ist, daß der rote Balkenreiz nur im Zeitraum zwischen 0 und 5 μsec auf die R-Rezeptoren wirkt (vgl. Pfeile).

Abb. 30 a,b Zu verschiedenen Zeitpunkten $t_i < t_{i+1}$ sind hier die R-G-Erregungen dargestellt. Zu beobachten ist das laterale Wegwandern der Netzwerkerregung vom primär angeregten Neuronenort. Der Reiz war ein 5 μsec dauernder Balkenreiz, der selektiv die R-Neuronen erregte. Der Balken hatte hier eine Länge von 800 μm. Das linke Balkenende lag am Neuronenort 200 (μm). Aus Rechenzeitgründen wurde die Netzwerkserregung nur am linken Balkenende untersucht. Die Werte t_5 in Abb. 30 b) wurden nachträglich in die Computerzeichnung eingetragen. (Zeichnungen nächste Seite).


RAEUMLICHE WANDERWELLE DER R-NEURONEN
MITTLERE KANALERREGUNG
NEURONENORT
t_3
t_2
t_1


RAEUMLICHE WANDERWELLE DER R-NEURONEN
MITTLERE KANALERREGUNG
NEURONENORT
t_4
t_5

7. FARBMUSTERMETRIK
EIN NEUES LINIENELEMENT, WELCHES DIE ÖRTLICHE VERTEILUNG DER FARBEN BEWERTET

In den vorangehenden Teilen der Arbeit wurde gezeigt, daß es Farbkantendetektoren geben muß, die zu dem komplexen Geschehen der Farbmustererkennung beitragen. Im folgenden soll versucht werden, mathematische Prinzipien zu finden, welche gleichzeitig Farb- und Musterinformation behandeln. Gelingt ein solcher Versuch, so könnten sich neue Möglichkeiten finden, Farbmusterdetektoren zu entwickeln.

Die älteren Linienelementtheorien verknüpfen lediglich drei Farbrezeptormechanismen mit dem Schwellenverhalten nach Weber. Als bekanntere Beispiele sind zu nennen die Linienelemente von v. Helmholtz (1886), Schrödinger (1920) und Stiles (1946). Das Linienelement von Vos und Walraven (1972) vereinigt einen physikalischen Aspekt, nämlich die Fluktuationstheorie, mit dem physiologischen, nämlich dem Zonenmodell des Farbensehens von v. Kries (1904) und Walraven (1962). Andere Linienelemente wurden aus mathematischen Gesetzmäßigkeiten hergeleitet. Beispielsweise erhält Resnikoff (1974) ein Linienelement aus der Forderung, daß der Farbraum dreidimensional, affin und lokal homogen ist,und der Annahme einer Riemannschen Metrik. Gemeinsam ist all diesen Theorien, daß die räumliche Verteilung der Farben nicht berücksichtigt ist. Im Gegensatz zu den älteren Ansätzen integriert das Farbmusterlinien-

element Farb- und Musterinformation und läßt sich im Sonderfall auf die herkömmlichen Linienelemente reduzieren. Drei Grundgedanken gaben die Anregung als mathematisches Modell eine Raumfarbmetrik zu definieren.

Ein komplexes Farbmuster kann man sich aus einfacheren Mustern (features) zusammengesetzt denken. Dabei überstreicht man durch Augenbewegung oder auch nur in Gedanken das farbige Muster in bestimmten Richtungen. Für ein mathematisches Modell dürfte es somit wichtig sein, Farbinformation längs beliebiger Linien über das Farbmuster zu sammeln.

Zum anderen ist bekannt, daß Aussagen über Farbeindrücke (selbst beim Erkennen von Farbpunkten!) nur über örtliche Integrationsprozesse gemacht werden können. Es genügt bekanntlich nicht, daß nur ein Rezeptor durch ein Lichtquant getroffen wird. Stets muß innerhalb eines durch neuronale Verschaltungstechniken bestimmten Zeitintervalls ein zweiter, benachbarter Rezeptor getroffen werden. Der zweite Grundgedanke ist somit, daß bei einem mathematischen Modell die offene Umgebung jedes Linienpunktes berücksichtigt werden muß. Zur Beurteilung des Farbmusters in P_o zieht man also die offenen Umgebungen des Punktes P_o heran. Bei diesen "topologischen Vorgehen" könnte eine evtl. Wichtung dieser Umgebungen nach dem Muster rezeptiver Felder erfolgen.

Der dritte Grundgedanke schließlich besteht darin, quantitative Aussagen über den Farbeindruck in den Umgebungen zu machen. Hierzu bietet sich ein Linienelement des Farbraumes an, welches unterschiedliche Farbeindrücke durch Abstände im Farbraum beschreibt. An dieser Stelle soll nicht eines der streng mathematisch abgeleiteten Linienelemente (Resnikoff, 1974) - welche von mir während des Entstehens der Arbeit näher untersucht wurden - herangezogen werden. Vielmehr wird einem sich in der Praxis bereits bewährtem Linienelement (Koenderink, Vos, Walraven, 1972) der Vorzug gegeben.

7.1 ABLEITUNG DES FARBMUSTERLINIENELEMENTS

In dem Gebiet FM = $\{ (x,y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq x \leq A,\ 0 \leq y \leq B \}$
sei ein ebenes Farbmuster vorgegeben

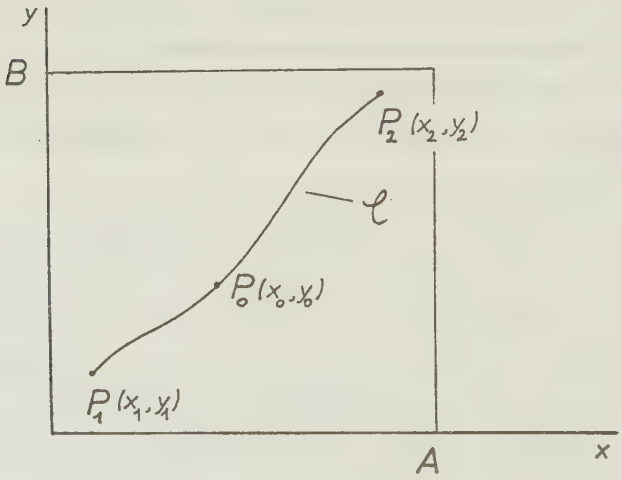


Abb. 31 Dargestellt ist der Weg $\mathcal{C}$, dem das Auge vom Beobachtungspunkt P_1 zu dem Punkt P_2 folgt, um z. B. Farbstufen zu detektieren.

Man bewegt sich auf einer beliebigen Kurve von P_1 nach P_2 und nimmt an, daß die Farbe in einem Punkt P_0 (x_0,y_0) bestimmt ist durch die Beiträge R,G,B der drei Farbrezeptormechanismen.

Wegen der in der Einleitung gemachten Grundvoraussetzung und wegen der Divergenz- und Konvergenzprinzipien der neurophysiologischen Verschaltungsmechanismen sollen auch die Rezeptoren der kreisförmigen Umgebung des Punktes $P_o(x_o, y_o)$ - also einer Kugel $K(x_o, y_o, \bar{R})$ - Beiträge zu der in P_o wahrgenommenen Farbe liefern. Es sind dann die Rezeptorerregungen in P_o bestimmt durch:

$$R(x_o, y_o) = \iint_{K(x_o, y_o, \bar{R})} R(x, y)\, r(x_o, y_o, x, y)\, dx\, dy = \iint_{0 \le \sqrt{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2} \le \bar{R}} R(x, y)\, r(x_o, y_o, x, y)\, dx\, dy$$

$$G(x_o, y_o) = \iint_{K(x_o, y_o, \bar{G})} G(x, y)\, g(x_o, y_o, x, y)\, dx\, dy$$

$$B(x_o, y_o) = \iint_{K(x_o, y_o, \bar{B})} B(x, y)\, b(x_o, y_o, x, y)\, dx\, dy$$

Die Wichtungsfunktionen nimmt man zunächst vereinfacht an zu:

$$r(x_o, y_o, x, y) = 1$$

$$g(x_o, y_o, x, y) = 1$$

$$b(x_o, y_o, x, y) = 1$$

Damit gilt:

$$R(x_o, y_o) = \int_{x_o - \bar{R}}^{x_o + \bar{R}} \left[\int_{y_o - \sqrt{\bar{R}^2 - (x - x_o)^2}}^{y_o + \sqrt{\bar{R}^2 - (x - x_o)^2}} R(x, y)\, dy \right] dx$$

$$G(x_o, y_o) = \int_{x_o - \bar{G}}^{x_o + \bar{G}} \left[\int_{y_o - \sqrt{\bar{G}^2 - (x - x_o)^2}}^{y_o + \sqrt{\bar{G}^2 - (x - x_o)^2}} G(x, y)\, dy \right] dx$$

$$B(x_o, y_o) = \int_{x_o - \bar{B}}^{x_o + \bar{B}} \left[\int_{y_o - \sqrt{\bar{B}^2 - (x - x_o)^2}}^{y_o + \sqrt{\bar{B}^2 - (x - x_o)^2}} B(x, y)\, dy \right] dx$$

Dem Punkt P_o kann somit jeder Wert des Farbraumes zugewiesen werden. Die Unterschiede der Farben, also die Abstände im Farbraum, werden durch ein Linienelement und der daraus folgenden Metrik beschrieben:

$$(ds)^2 = \frac{(dR)^2 + (dG)^2 + (dB)^2}{(R + G + B)^2}$$

Da die Farben aber von Punkt zu Punkt verschieden sein können, also von den Koordinaten in $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ abhängen, gilt:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial R}{\partial y_0} dy_0$$
$$dG = \frac{\partial G}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial G}{\partial y_0} dy_0$$
$$dB = \frac{\partial B}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial B}{\partial y_0} dy_0$$

Es gilt nun allgemein:

Wenn $F(y) = \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f(x,y)\, dx$, dann ist unter den Voraussetzungen des Satzes über die Differenzierbarkeit der durch Integrale dargestellten Funktionen:

$$F'(y) = \int_{\varphi(y)}^{\psi(y)} f_y(x,y)\, dx + f(\psi(y),y)\,\psi'(y) - f(\varphi(y),y)\,\varphi'(y)$$

Damit folgt dann:

$$\frac{\partial R}{\partial x_0} = \int_{x_0-\bar{R}}^{x_0+\bar{R}} \frac{x - x_0}{\sqrt{\bar{R}^2 - (x-x_0)^2}} \left[R\left(x, y_0+\sqrt{\bar{R}^2-(x-x_0)^2}\right) + R\left(x, y_0-\sqrt{\bar{R}^2-(x-x_0)^2}\right)\right] dx$$

Setzt man weiterhin $R(x,y)$, $G(x,y)$ und $B(x,y)$ als stetig voraus, was vom physikalischen Standpunkt aus gesehen stets in guter Näherung möglich ist, so erhält man mit dem Satz von Fubini und dem oben angegebenen Satz:

$$\frac{\partial R}{\partial y_0} = \int_{x_0-\bar{R}}^{x_0+\bar{R}} \left[R\left(x, y_0+\sqrt{\bar{R}^2-(x-x_0)^2}\right) - R\left(x, y_0-\sqrt{\bar{R}^2-(x-x_0)^2}\right)\right] dx$$

Analoge Werte folgen für $\frac{\partial G}{\partial x_0}$, $\frac{\partial G}{\partial y_0}$, $\frac{\partial B}{\partial x_0}$, $\frac{\partial B}{\partial y_0}$

Mit den Vereinbarungen:

$$H^2 = (R + G + B)^2$$

$$A = \left(\frac{\partial R}{\partial x_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial x_0}\right)^2$$

$$B = \left(\frac{\partial R}{\partial y_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y_0}\right)^2$$

$$C = \frac{\partial R}{\partial x_0}\frac{\partial R}{\partial y_0} + \frac{\partial G}{\partial x_0}\frac{\partial G}{\partial y_0} + \frac{\partial B}{\partial x_0}\frac{\partial B}{\partial y_0}$$

folgt:

$$(ds)^2 = \frac{1}{H^2}\left[A\,dx_0^2 + B\,dy_0^2 + 2C\,dx_0 dy_0\right]$$

Durch Parametrisierung des Linienelementes des Farbraumes, bzw. durch das Zuordnen eines Elementes des Farbraumes zu jedem Punkt des ebenen Gebietes unter Berücksichtigung der Abstände der Elemente des Farbraumes ergibt sich ein Linienelement, welches in der euklidischen Ebene gilt. Mit diesem Linienelement ist aber eine willkürliche Abstandsfunktion in Form einer Metrik oder einer Halbmetrik in der Farbmusterebene gegeben.

Man kann also einen "Farbmusterabstand" zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 so definieren:

$$S_{12} = \oint_{P_1}^{P_2} \frac{1}{H}\sqrt{A + B\left(\frac{dy_0}{dx_0}\right)^2 + 2\cdot C\cdot\frac{dy_0}{dx_0}}\;dx_0$$

Die Ableitung

$$\frac{dy_0}{dx_0} = y_0'$$

und das Quadrat hiervon $y_0'^2 = \left(\frac{dy_0}{dx_0}\right)^2$ hängen ab von dem Weg φ, also der Funktion $y_0 = f(x_0)$. Nachträglich ist also zu

vereinbaren, daß die Wege zwischen P_1 und P_2 durch Funktionen im x-, y- Koordinatensystem darstellbar sein müssen.

Bei Wegen parallel zur y-Achse hilft man sich durch (Vertauschen von x und y, also durch) Drehung des Koord.-systems um 90°.

Der Ausdruck S_{12} stellt bereits ein parametrisiertes Linienintegral zweiter Art zwischen den Punkten P_1 (x_1, y_1) und P_2 (x_2, y_2) dar, so daß gilt:

$$S_{12} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{H} \sqrt{A + B y_0'^2 + 2 \cdot C \cdot y_0'} \, dx_0 = \int_{x_1}^{x_2} F(x_0, y_0, y_0') \, dx_0$$

Wie der Wert aller Linienintegrale hängt auch dieser Integralwert von der Durchlaufrichtung ab. Durch diesen Ausdruck ist also eine Halbmetrik bestimmt, sofern man nicht mit dem Betrag von S_{12} rechnet.

Für die folgenden Überlegungen sei der Integrand stets mit $F(x_0, y_0, y_0')$ bezeichnet.

Durch Variation über den Weg $\mathcal{C}$ zwischen den festen Punkten P_1 und P_2 kann man die Extremwerte von S_{12} (größte bzw. kleinste Farbmusteränderung) bestimmen:

$$S_{12} = \text{extrem} \int_{x_1}^{x_2} F(x_0, y_0, y_0') \, dx_0$$

7.2 EINE ANWENDUNG DER FARBMUSTERMETRIK

Zunächst einmal fragt man sich, ob bzw. wann in einem überprüfbaren Fall für S_{12} ein Extremalproblem im Sinne der Variationsrechnung vorliegen kann.

Die Eulersche Gleichung für das allgemeine Problem lautet:

$$\frac{\partial F}{\partial y_o} - \frac{\partial^2 F}{\partial y_o'^2} y_o'' - \frac{\partial^2 F}{\partial y_o' \partial y_o} y_o' - \frac{\partial^2 F}{\partial y_o' \partial x_o} = 0$$

Im experimentell nachprüfbarem Fall soll ein Farbmuster zugrunde liegen, wie es als Testfeld bei den Versuchen zur unterschwelligen Summation verwendet wurde. Das Farbmuster soll nur von x abhängen:

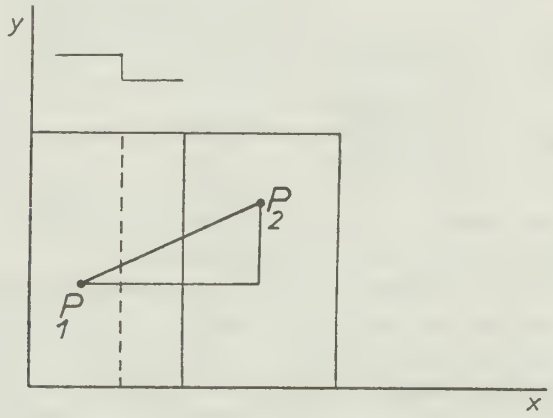


Abb. 32 Bei einem Farbmuster, welches dem Testfeld in Abb. 1 entspricht, sucht man z.B. auf der geraden Verbindungslinie zwischen P_1 und P_2 nach einer Farbkante.

Man kann zeigen, daß in diesem Fall

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y_o'^2} \equiv 0$$

gilt.

Dies ist aber dann und nur dann der Fall, wenn mit den verwendeten Abkürzungen gilt:

$$B\,A = C^2$$

Da bei diesem Testfeld gilt:

$$\frac{\partial R}{\partial y_o} = \frac{\partial G}{\partial y_o} = \frac{\partial B}{\partial y_o} \equiv 0$$

ergibt sich nun $BA = 0$ und $C^2 = 0$, womit also obige Behauptung bewiesen ist.

Für den Fall $\frac{\partial^2 F}{\partial y_o'^2} = 0$ ist bekannt, daß sich $F\ (x_o, y_o, y_o')$ folgendermaßen darstellen läßt:

$$F\ (x_o, y_o, y_o') = \varphi(x_o, y_o) + \psi(x_o, y_o)\, y_o'$$

In diesem Fall gilt:

$$\psi(x_o, y_o) \equiv 0 \quad \text{und} \quad \varphi(x_o, y_o) = \frac{1}{H}\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial x_o}\right)^2}$$

und damit:

$$\frac{\partial \psi(x_o, y_o)}{\partial x_o} \equiv \frac{\partial \varphi(x_o, y_o)}{\partial y_o} = 0$$

Damit ist also $F\ (x_o, y_o, y_o') \cdot dx$ ein vollständiges Differential und der Wert des Integrals

$$\int_{P_1(x_1, y_1)}^{P_2(x_2, y_2)} F(x_o, y_o, y_o')\, dx_o$$

unabhängig vom Weg.

Dies ist in bester Übereinstimmung mit den experimentell gefundenen Daten. Die Versuche ergaben stets die gleichen Ergebnisse unabhängig "von dem Weg", den wir zwischen zwei zu vergleichenden Punkten auf beiden Testfeldern infolge willkürlicher und unwillkürlicher Augenbewegungen begingen.

In diesem Fall liegt also kein Extremalproblem im Sinne der Variationsrechnung vor. (Damit erübrigt sich natürlich auch das Überprüfen der Jacobischen Bedingung, die für das Hinreichen eventueller Extremalen erfüllt sein muß.)

7.3 ERWEITERUNG DES FARBMUSTERLINIENELEMENTS DURCH WICHTUNG DER SUMMATIONSGEBIETE

Die Wichtungsfunktionen

$$r(x_0, y_0, x, y), \quad g(x_0, y_0, x, y), \quad b(x_0, y_0, x, y)$$

sollen die Glockenkurvenform annehmen:

$$r(x_0, y_0, x, y) = \tilde{R}(x_0, y_0) \cdot e^{-\frac{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2}{\tilde{r}(x_0, y_0)}}$$

$$g(x_0, y_0, x, y) = \tilde{G}(x_0, y_0) \cdot e^{-\frac{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2}{\tilde{g}(x_0, y_0)}}$$

$$b(x_0, y_0, x, y) = \tilde{B}(x_0, y_0) \cdot e^{-\frac{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2}{\tilde{b}(x_0, y_0)}}$$

Im folgenden seien $\tilde{R}(x_0, y_0)$, $\tilde{G}(x_0, y_0)$ und $\tilde{B}(x_0, y_0)$ Konstanten und zwar $\tilde{R}$, $\tilde{G}$ und $\tilde{B}$. Der Einfachheit halber seien nur von x abhängige Muster betrachtet und hiermit:

$$\tilde{r}(x_0, y_0) = \tilde{r}(x_0), \quad \tilde{g}(x_0, y_0) = \tilde{g}(x_0), \quad \tilde{b}(x_0, y_0) = \tilde{b}(x_0)$$

$$\frac{\partial}{\partial y_0}\tilde{r} = 0 \qquad \frac{\partial}{\partial y_0}\tilde{g} = 0 \qquad \frac{\partial}{\partial y_0}\tilde{b} = 0$$

Einfache Integrationen (vgl. z.B. Gröbner und Hofreiter, 1965) im Falle sinusförmiger Rot-, Grün- und Blaumuster der Raumfrequenz $\gamma = \Omega/2\pi$ führen zu den Rezeptorbeiträgen:

$$R(x_0, y_0, \tilde{r}) = \pi \cdot \tilde{r}^2(x_0) \cdot \tilde{R} \cdot e^{-\frac{\Omega^2 \tilde{r}^2(x_0)}{4}} \cos(-\Omega x_0)$$

$$G(x_0, y_0, \tilde{g}) = \pi \cdot \tilde{g}^2(x_0) \cdot \tilde{G} \cdot e^{-\frac{\Omega^2 \tilde{g}^2(x_0)}{4}} \cdot \cos(-\Omega x_0)$$

$$B(x_0, y_0, \mathcal{T}) = \pi \cdot \tilde{\mathcal{T}}^2(x_0) \cdot \tilde{B} \cdot e^{-\frac{\Omega \tilde{\mathcal{T}}^2(x_0)}{4}} \cdot \cos(-\Omega \cdot x_0)$$

Die Metrik lautet in diesem Fall:

$$S_{12} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{H} \sqrt{A + B y_0'^2 + 2[C + F] \cdot y_0' + D + 2 \cdot E}\, dx_0$$

mit den zusätzlichen Abkürzungen:

$$D = \left(\frac{\partial R}{\partial \tilde{\mathcal{T}}}\right)^2 \tilde{\mathcal{T}}'^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \tilde{q}}\right)^2 \tilde{q}'^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \tilde{\mathcal{B}}}\right)^2 \mathcal{B}'^2$$

$$E = \frac{\partial R}{\partial \tilde{\mathcal{T}}} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_0} \cdot \tilde{\mathcal{T}}' + \frac{\partial G}{\partial \tilde{q}} \frac{\partial G}{\partial x_0} \tilde{q}' + \frac{\partial B}{\partial \tilde{\mathcal{B}}} \frac{\partial B}{\partial x_0} \mathcal{B}'$$

$$F = \frac{\partial R}{\partial \tilde{\mathcal{T}}} \cdot \frac{\partial R}{\partial y_0} \cdot \tilde{\mathcal{T}}' + \frac{\partial G}{\partial \tilde{q}} \cdot \frac{\partial G}{\partial y_0} \tilde{q}' + \frac{\partial B}{\partial \tilde{\mathcal{B}}} \frac{\partial B}{\partial y_0} \mathcal{B}'$$

Die Eulerschen Gleichungen des entsprechenden Extremalproblems lauten:

I $$\frac{\partial F}{\partial y_0} - \frac{d}{dx_0}\left(\frac{\partial F}{\partial y_0'}\right) = 0$$

II $$\frac{\partial F}{\partial \tilde{\mathcal{T}}} - \frac{d}{dx_0}\left(\frac{\partial F}{\partial \tilde{\mathcal{T}}'}\right) = 0$$

III $$\frac{\partial F}{\partial \tilde{q}} - \frac{d}{dx_0}\left(\frac{\partial F}{\partial \tilde{q}}\right) = 0$$

IV $$\frac{\partial F}{\partial \mathcal{B}} - \frac{d}{dx_0}\left(\frac{\partial F}{\partial \mathcal{B}}\right) = 0$$

mit

$$F(x_0, y_0, y_0', \tilde{\mathcal{T}}, \tilde{q}, \mathcal{B}, \tilde{\mathcal{T}}', \tilde{q}', \mathcal{B}') = \frac{1}{H} \sqrt{A + B y_0'^2 + 2[C + F] y_0' + D + 2 \cdot E}$$

7.4 DIE ANWENDUNG DER ERWEITERTEN FARBMUSTER-METRIK IM SONDERFALL KONSTANTER WICHTUNGS-KURVEN INNERHALB DER FARBKANÄLE AUF SINUS- ODER COSINUSFÖRMIGE ROT-, GRÜN-MUSTER

Es soll nun ein evtl. Zusammenhang zwischen Raumfrequenz des Musters und Wichtungsfunktionsweite gesucht werden.

Um eine Lösung in geschlossener Integration zu finden, soll die Lösungsmenge von vornherein eingeschränkt werden auf den Bereich gleicher Wichtungsfunktionen in den Farbkanälen für alle Teile des Musters und horizontale Augenbewegungen, d.h.,

$$\frac{\partial F}{\partial y_o} = \frac{\partial F}{\partial y_o'} = 0$$

Außerdem soll das Muster ein Rot-Grün-Gitter (cos-förmig) sein mit konstantem Blauanteil, d.h.,

$$B(x_o, y_o) = B(x_o) = \text{const.}$$

und

$$\frac{\partial B}{\partial x_o} = 0$$

In diesem Fall vereinfacht sich F zu:

$$F = \frac{1}{H}\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_o}\right)^2}$$

Gleichung II soll gelöst werden.

Es gilt [mit $R = R(x_o, y_o)$, $G = G(x_o, y_o)$, $B = B(x_o, y_o)$]:

$$\frac{\partial F}{\partial \tilde{T}'} = \frac{\frac{\partial R}{\partial x_o}\cdot\frac{\partial}{\partial \tilde{T}'}\left(\frac{\partial R}{\partial x_o}\right)[R+G+\text{const.}] - \frac{\partial}{\partial \tilde{T}} R\left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_o}\right)^2\right]}{\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_o}\right)^2}\,[R+G+\text{const.}]}$$

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{T}}\frac{\partial R}{\partial x_o} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial \tilde{T}'}\frac{\partial R}{\partial x_o} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial \tilde{T}'} R(x_o, y_o) = 0$$

Daraus folgt dann:

$$\frac{\partial F}{\partial \tilde{T}'} = 0$$

Das bedeutet aber, daß gelten muß:

$$\frac{d}{dx_0}\left(\frac{\partial F}{\partial \tilde{f}'}\right) = 0$$

oder:

$$0 = -\frac{\pi \cdot \tilde{f}(x_0) \cdot \tilde{R} \cos(-\Omega x_0) \cdot e^{-\frac{\Omega \tilde{f}(x_0)}{4}} (2 - \tilde{f}^2(x_0) \cdot \Omega/2) \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_0}\right)^2\right]}{\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_0}\right)^2} \left[R + G + \text{const.}\right]}$$

Der Nenner ist übrigens stets von Null verschieden, da für ein Rot-Grün-Gitter eine Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$ zwischen den Cosinuskomponenten besteht.

Wenn gleichzeitig $r(x_0) = \text{const} \neq 0$

und (II) identisch Null gelten sollen, findet man:

$$2 - \tilde{f}^2(x_0) \cdot \frac{\Omega}{2} = 0 \qquad \text{oder} \qquad \tilde{f}(x_0) = \frac{2}{\sqrt{\Omega}}$$

Analog dürfte für den Grünkanal wegen gleicher Frequenz der Cosinuskomponente folgen: $\tilde{g}(x_0) = \frac{2}{\sqrt{\Omega}}$

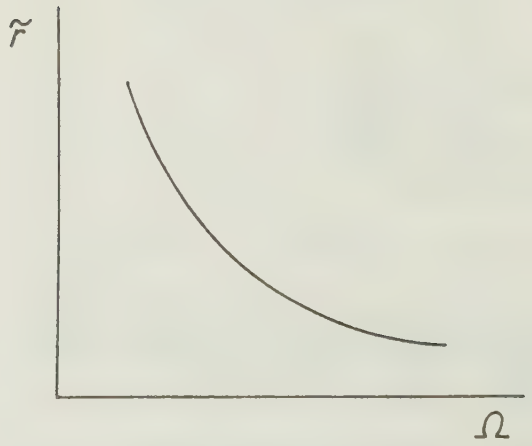


Abb. 33a Die Anwendung des Extremalprinzips im Falle des Farbmusterlinienelementes liefert das "anschauliche" Ergebnis, daß bei Detektion von Farbgittern kleiner Raumfrequenz $\nu = \Omega/2\pi$ die Wichtungsfunktionsweite $\tilde{f}$ groß sein muß.

Unter den vereinfachten Voraussetzungen konstanter Summationsgebiete innerhalb der Farbkanäle, welche unabhängig vom Musterort sind, und bei Vernachlässigung der Randprobleme - diese folgen aber nachträglich zwangsläufig aus der Gitterfrequenz - folgt als sehr brauchbares Ergebnis, daß bei nicht zu niedrigen Ortsfrequenzen der Farbgitter enge glockenförmige Summationskurven tatsächlich Lösungen des Extremalproblems sind.

Auswirkungen auf die Farbmustererkennung seien nur kurz angedeutet. Offenbar sind als Wichtungsfunktionen Gaußsche Glockenkurven geeignet, sinus- und cosinusförmige Farbmuster zu detektieren.

Aus diesem Ergebnis lassen sich noch weitere (experimentell nachgeprüfte) Beziehungen folgern. Für den Sonderfall einer konstanten Wichtungsfunktionsweite $\tilde{r}(x_0) = \text{const.}$ (bei einer bestimmten Raumfrequenz) liefert das Extremalprinzip:

$$\tilde{r}(x_0) = \frac{2}{\sqrt{\Omega}}$$

Da gilt:

$$R(x_0,y_0) = \iint_{K(x_0,y_0,\tilde{R})} R(x,y) \cdot r(x_0,y_0,x,y)\, dx\, dy$$

$$r(x_0,y_0,x,y) = \tilde{R}(x_0,y_0) \cdot e^{-\frac{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2}{\tilde{r}(x_0,y_0)}} \quad \text{mit} \quad \tilde{R}(x_0,y_0) = \text{const.}$$

resultiert daraus folgender Rezeptorbeitrag (Abschnitt 7.3):

$$R(x_0,y_0,\tilde{r}) = R(x_0,\tilde{r}) = \pi \cdot \tilde{r}^2(x_0)\, \tilde{R} \cdot e^{-\frac{\Omega\, \tilde{r}^2(x_0)}{4}} \cos(-\Omega x_0)$$

$$= \pi \cdot \frac{4}{\Omega}\, \tilde{R}\, e^{-1} \cos(-\Omega x_0)$$

also

$$R(x_0,\tilde{r}) = \frac{4 \cdot \pi \cdot \tilde{R}}{\Omega \cdot e} \cos(-\Omega x_0)$$

Geht man von der brauchbaren Näherung aus, daß bei einer bestimmten Raumfrequenz (die Rezeptorbeiträge) an der Schwelle (konstant sind und) die Modulation m_{x_0} um so größer sein muß, je kleiner die Rezeptorbeiträge in x_0 sind, so gilt:

$$R(x_0, \Omega) = \frac{4 \cdot \pi \cdot \tilde{R}}{e \Omega} \cos(-\Omega x_0) = m_{x_0}^{-1}$$

oder

$$m_{x_0} = \frac{e}{4 \cdot \pi \cdot \tilde{R}} \frac{\Omega}{\cos(-\Omega x_0)}$$

Je nach Wahl von x_0 erhält man eine Schar von Kurven, welche den Zusammenhang zwischen Raumfrequenz und Modulation als tiefpaßförmig ausweisen. Das tiefpaßartige Verhalten ist in Übereinstimmung mit unseren Versuchsergebnissen (Abschnitt 5) sowie mit experimentellen Schwellenuntersuchungen an Rot-Grün-Gittern (van der Horst und Bouman, 1969).

Man kann auch eine "mittlere Modulationsgröße" $\overline{m}_{x_0}$ einführen, indem man annimmt, daß erst die Beobachtung eines Bereiches $0 \leq x \leq a$ zur Detektionsentscheidung führt:

$$\overline{m}_{x_0} = : m = \frac{e}{4 \cdot \pi \cdot \tilde{R}} \int_0^a \frac{\Omega}{\cos(-x_0 \Omega)} \, dx_0 =$$

$$= \frac{e}{4 \cdot \pi \cdot \tilde{R}} \ln \left| \tan \left(\frac{a \Omega}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|$$

Auch dieses Ergebnis erweist eine tiefpaßartige Modulationsübertragungsfunktion bei rein farbmodulierten (hier Rot-Grün-) Gittern (Abb. 33 b).

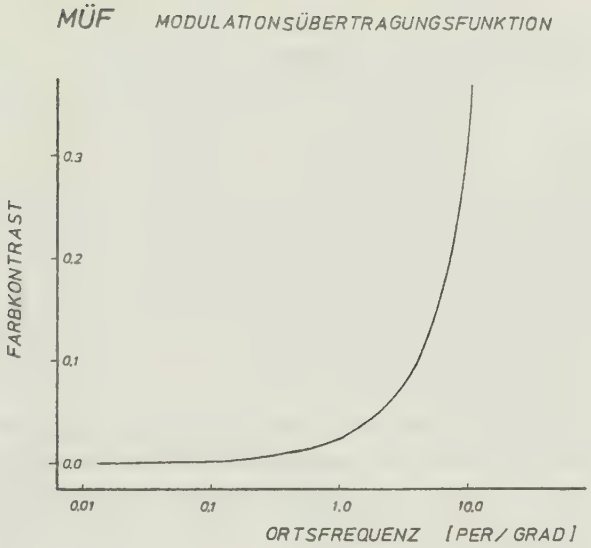


Abb. 33 b In dieser Abbildung ist gezeigt, daß das Extremalprinzip die Modulationsübertragungsfunktion für rein farbmodulierte Rot-Grün-Gitter als Tiefpaßkurve beschreibt. Das Tiefpaßverhalten ist in Übereinstimmung mit entsprechenden Experimenten von van der Horst und Bouman (1969).

7.5 EIN GRENZFALL DES FARBMUSTERLINIENELEMENTES

Es soll noch gezeigt werden, daß sich durch geeignete Wahl der Wichtungsfunktion ein besonders einfaches Linienelement des Farbmusterraumes ergibt.

Hierzu definiert man die Wichtungsfunktionen folgendermaßen:

$$r(x_o, y_o, x, y) = \delta(x_o - x)\ \delta(y_o - y)$$
$$g(x_o, y_o, x, y) = \delta(x_o - x)\ \delta(y_o - y)$$

und :

$$b\ (x_0, y_0, x, y) = \delta(x_0 - x)\ \delta(y_0 - y)$$

Für die Erregung des Rotkanals im Punkt (x_0, y_0) gilt dann (mit den Beiträgen $R(x,y)$ des Musters zum Rotkanal):

$$R\ (x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(x_0, y_0, x, y)\ R(x,y)\ dy\ dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - x)\ \delta(y_0 - y)\ R(x,y)\ dy\ dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - x) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} R(x,y)\ \delta(y_0 - y)\ dy \right] dx =$$

(Integration durch Substitution)

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - x)\ R(x, y_0)\ dx = R(x_0, y_0)$$

Analoges gilt für

$$G(x_0, y_0) \quad \text{und} \quad B(x_0, y_0)$$

Bei dieser Form des Linienelementes liefert die Umgebung des fixierten Punktes keinen Beitrag mehr. Vielmehr wird jedem Punkt des Ortsraumes der entsprechende Wert des Farbraumes zugeordnet (einfache Parametrisierung). Und in jedem Punkt des Ortsraumes beschreibt die Metrik die Eigenschaften des Farbraumes. Im Falle einer homogenen Fläche erhält man somit das alte Linienelement des Farbraumes.

7.6 EIN WEITERES BEISPIEL FÜR EINE BESONDERS EINFACHE WICHTUNGSFUNKTION

Die glockenkurvenförmigen Wichtungsfunktionen (aus der Grundmenge der für jeden Farbkanal konstanten Wichtungsfunktionen) waren bei geeigneter Wahl der Parameter Lösungen des Extremalproblems sinusförmiger Rot-Grün-Gitter.

Durch Probieren könnte man versuchen, für andere einfache Farbmuster Wichtungsfunktionen anzugeben, die ebenfalls Lösungen des Extremalproblems sind.

Das Farbmuster soll aus einer Rotstufe bestehen. Das gesamte Testfeld soll wie das bei der unterschwelligen Summation verwendete konfiguriert sein und mit horizontalen Augenbewegungen ($y_0' = 0$) gemustert werden.

Man hat also für den Rotsprung:

$$R(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

$$G(x,y) = \text{const.} = k_g \quad , \quad \text{also} \quad \frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\partial G}{\partial y} = 0$$

$$B(x,y) = \text{const.} = k_b \quad , \quad \text{also} \quad \frac{\partial B}{\partial x} = \frac{\partial B}{\partial y} = 0$$

Behauptet wird, daß mit der einfachen Wichtungsfunktion

$$r(x_0, y_0, x, y) = \delta(x_0 - x) \cdot h(y_0 - y)$$

mit $$h(y) = \begin{cases} 1 & -\frac{b}{2} \le y \le +\frac{b}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

das Extremalproblem gelöst werden kann (wenn $g \equiv b \equiv r$).

Dies läßt sich folgendermaßen zeigen:

$$R(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - x)\, h(y_0 - y)\, R(x)\, dy\, dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - x)\, R(x) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} h(y_0 - y)\, dy \right] dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - x) \cdot R(x) \cdot L \cdot dx = L \cdot R(x_0)$$

Zu zeigen ist noch:

$$\frac{\partial F}{\partial r} - \frac{d}{dx_0} \left(\frac{\partial F}{\partial r'} \right) = 0 \qquad (*)$$

Da gilt:

$$\frac{\partial R}{\partial r} = \frac{\partial g}{\partial g} = \frac{\partial b}{\partial b} = 0$$

vereinfacht sich F zu:

$$F = (\pm)\, \frac{1}{H}\, \frac{\partial R(x_0)}{\partial x_0} = (\pm)\, \frac{1}{H}\, L\, \frac{\partial R(x_0)}{\partial x_0} = (\pm) \frac{L}{H}\, \delta(x_0)$$

damit ist aber: $$\frac{\partial F}{\partial r} = 0$$

und $$\frac{\partial F}{\partial r'} = 0$$ also die Gleichung $(*)$

erfüllt. Die Wichtungsfunktionen $f(x_o - x)\ h(y_o - y)$ sind also Lösungen des Extremalproblems der Raumfarbmetrik.

7.7 BEMERKUNGEN ZU DIESEM ABSCHNITT

Das völlig neue Konzept einer Farbmetrik, welche auch die örtliche Verteilung der Farben berücksichtigt, liefert in Anwendung auf experimentell nachprüfbare Versuchsbedingungen recht brauchbare Beschreibungen der Ergebnisse.

So erweist beispielsweise Abschnitt 7.2 die Unabhängigkeit der Versuchsergebnisse (bei horizontal strukturierten Testfeldern) von Augenbewegungen.

Von besonderem Interesse sind jedoch die Ergebnisse aus Abschnitt 7.4, da sich hier ein Vergleich sowohl mit den Befunden des experimentellen Teils dieser Arbeit als auch mit in der Literatur beschriebenen Versuchen anbietet. So lassen sich aus unseren Versuchen tiefpaßartige Gitterempfindlichkeitsfunktionen folgern, was z. B. mit Ergebnissen von van der Horst und Bouman (1969) übereinstimmt. Aber auch die neue Metrik beschreibt in Abschnitt 7.4 Schwellenmessungen an Chromatizitätsgittern mit Modulationsübertragungsfunktionen von Tiefpaßcharakter.

8. "KATASTROPHENTHEORIE" UND FARBMUSTERERKENNUNG

Die Katastrophentheorie, auch als "allgemeine Theorie der stabilen Formen" bezeichnet, sollte geeignet sein, Prozesse der Muster- und insbesondere Farbmusterverarbeitung zu beschreiben.

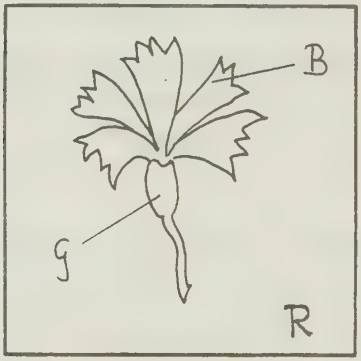


Abb. 34 Hier ist ein ebenes Farbmuster vorgegeben. In den "regulären Punkten" beobachtet man eine schwache Änderung der Farben. Drastische Zustandsänderungen beobachtet man in den Rändern ∂M_i dieser Gebiete.

Ein vorgegebenes Farbmuster M (vgl. Abb. 34) nämlich läßt sich in verschiedene Gebiete M_1, M_2,....,M_n,.... einteilen, die sich dadurch auszeichnen, daß sich die Zustände in benachbarten Punkten innerhalb dieser Gebiete nur schwach voneinander unterscheiden. Diese Zustände sind durch die Anteile R,G,B an drei Primärvalenzen $\vec{R},\vec{G},\vec{B}$ in Farbe und Intensität bestimmt. Die so definierten Punkte innerhalb der Gebiete M_i nennt man auch reguläre Punkte. In den Rändern ∂M_i dieser Gebiete beobachtet man plötz-

liche Zustandsänderungen. Diese Randpunkte oder "Katastrophenpunkte" bilden also die Helligkeits- oder Farbkonturen des Musters. Erfahrungsgemäß beobachtet man bei der Mustererkennung und -verarbeitung eine doppelte Stabilität. Erstens sind die Formen auch bei kleinen Änderungen derselben als solche noch erkennbar und zweitens beeinträchtigen auch kleine neuronale Störungen das Erkennen des Musters nicht. Da die Prozesse demnach strukturell stabil sind, gibt es ein morphogenetisches Feld, welches den Vorgang der Musterverarbeitung beschreibt. Unter den Bedingungen, daß der neuronale Prozeß durch eine Energiefunktion beschrieben wird, und der Gleichwertigkeit der Attraktoren (im metabolischen Fall), läßt sich aber der Prozeß auf eine der "sieben Naturformen oder Katastrophen" (Thom, 1975) zurückführen.

Bei einem reinem Farbmuster (einer bestimmten aber konstanten Intensität) läßt sich die Farbe in jedem Punkt des Musters durch einen Punkt(-Vektor) im Farbraum beschreiben, welcher auf einer differenzierbaren Mannigfaltigkeit U des Farbraums liegt. Sei V die Bildmannigfaltigkeit (der reellen Zahlen). Nach Thom (1975) läßt sich der "statische" Prozeß (der Farbzuordnung) zu jedem regulären Punkt x des Feldes lokal durch eine Menge von Abb. $G: W \times U \rightarrow V$ beschreiben, wobei W eine Umgebung $F \times T$ von $x=(y,t)$ und $y \in F$ ist ($F \subseteq \mathbb{R}^2$ Farbmusterfläche, $T \subset \mathbb{R}$ Zeit). Im regulären Punkt x wird der Prozeß aber durch eine Abb. $g_x: u \rightarrow v = G(x,u)$ beschrieben. Die Änderung des statischen Feldes um den regulären Punkt x werde (nach Thom, 1975) durch eine"Evolutionsgleichung"(mit den bekannten Existenz- und Eindeutigkeitseigenschaften der Evolutionsgleichungen) $\frac{dg}{dt} = H(g,y,t)$ beschrieben. Im einfachsten Fall wäre eine Katastrophe (von Korang eins – nur Betrachtung der Wellenlängen – oder zwei) der Codimension eins (räumliche Grenzen) zu diskutieren. Mit der "metabolischen Beschreibungsform" lassen sich wohl mehr die neuronalen Farbmusterverarbeitungsmechanismen beschreiben.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Die erstmals auf die Farbkanäle angewendete Methode der unterschwelligen Summation zeigt, daß nur der Farbanteil und nicht der Helligkeitsanteil des Induktionsfeldes zur Farbkantendetektion beiträgt. Ab einer Testfeldgröße von etwa 5^{o} Gesichtsfeldwinkel beobachtet man eine deutliche Zunahme der lateralen Summation. Die Induktionsfarben, mittels monochromatischer Interferenzfilter erzeugt, und die mittels Farbfiltergläsern erzeugten Testfeldfarben beeinflussen die Summationsweiten nicht signifikant. Untersuchungen an (unbunten) Helligkeitsmustern, insbesondere an Helligkeitskanten, führen zu Ergebnissen, welche deutliche Inhibition aufweisen. Dieser im allgemeinen als Machphänomen bezeichnete Effekt ist bei dem Farbkantenabgleich nicht nachweisbar. Die Methode der unterschwelligen Summation dient demnach auch als direkter Nachweis des Fehlens dieses Effektes in Farbkanälen.

Die Ergebnisse legen es nahe, im Abschnitt der Modellbetrachtungen einen "Farbkantendetektor" zu postulieren. Dann werden die Ergebnisse im Lichte der linearen Systemtheorie diskutiert.

Die Anwendung der Methode der Fouriertechnik macht deutlich, daß die systembeschreibende Modulationsübertragungsfunktion im Falle der Farbversuche Tiefpaßverhalten, bei den Helligkeitsversuchen jedoch Bandpaßverhalten aufweist. Die Approximation der Ergebnisse kann aber auch mit einem Ansatz von Tiefpaßkurven erfolgen, deren Bandbreite von der Lage der Farbkante abhängt. Im ersten Fall wird die

Kantendetektion also in einem "Kanal" erfolgen, im zweiten Fall ist eine ganze "Schar von Kanälen" hierfür zuständig.

Auch ein Rezeptives-Feld-Modell beschreibt die Ergebnisse recht gut. Der Versuch, die stark sigmoid ausgeprägten Modellkurven noch besser an die experimentellen Befunde anzupassen, führt zu der Vorstellung eines nichtlinear arbeitenden Systems.

In dem nichtlinearen Modell wird postuliert, daß die adäquate mathematische Methode zur Beschreibung des Informationsflusses zwischen neuronalen Schichten des Nervensystems die der Wahrscheinlichkeitssummation ist. Die experimentellen Befunde lassen sich so modellmäßig gut beschreiben.

Die Erweiterung der Methoden einer nichtlinearen Netzwerktheorie auf die Probleme des Farbensehens liefert ein part. nichtlineares Integrodifferentialgleichungssystem. Dieses wird im Sonderfall des dichromatischen Sehens für zwei Beispiele gelöst. In dem einen Fall untersucht man das zeitliche Einschwingverhalten des Systems an einer Stelle des Netzwerkes, im anderen Fall wird die örtliche Erregungsverteilung über dem Netzwerk zu verschiedenen Zeiten ermittelt.

Die Ergebnisse eines erstmalig definierten Linienelementes, welches die örtliche Verteilung der Farben berücksichtigt, geben Aufschlüsse über mögliche Prinzipien der Musterverarbeitung. So wird beispielsweise mit Hilfe der Variationsrechnung gezeigt, daß die Breite von Wichtungskurven in Farbkanälen abnehmen muß, wenn die Ortsfrequenzen eines

Sinusfarbgitters zunehmen. Ebenso kann gezeigt werden, daß die Modulationsübertragungsfunktion in Übereinstimmung mit in der Literatur angegebenen Ergebnissen bei reinen Farbsinusgittern tiefpaßartig ist. Aber auch aus den experimentellen Befunden dieser Arbeit läßt sich ja der Tiefpaßcharakter der Farbgitterempfindlichkeitsfunktion folgern.

In einer abschließenden Betrachtung wird die Vermutung ausgedrückt, daß mittels der "Katastrophentheorie" die neuronale Verarbeitung von Mustern beschrieben werden kann. Hierzu definiert man die Punkte innerhalb eines Musters, die sich nur wenig von den Nachbarpunkten unterscheiden als "reguläre Punkte." Die Helligkeits- oder bzw. und Farbkonturen, in denen also eine sprunghafte und damit unstetige Veränderung beobachtet wird, sind die Katastrophenlinien.

10. LITERATURVERZEICHNIS

Abramowitz, M. und Stegun, I.A. (1972). Handbook of mathematical functions.
New York: Dover.

Alpern, M. (1965). Rod-cone independence in the after-flash effect.
J. Physiol. 176, 462 - 472.

Barlow, H.B. und Levick, W.R. (1968). The Purkinje shift in the cat retina.
J. Physiol. 196, 2 - 3 P.

Bekesy, G.v. (1968). Mach-and Hering-type lateral inhibition in vision
Vis. Res. 8, 1483 - 1499.

Bender, B.G. (1973). Spatial interactions between the red- and green - sensitive colour mechanisms of the human visual system.
Vis. Res. 13, 2205 - 2218.

Beurle, R.L. (1957). Properties of a mass of cells capable of regenerating pulses.
Phil. Trans. Roy. Soc. of London, A 240, 55 - 94.

Breenbaum, M.C. (1967). Transplantation and immunosuppression.
In: Modern trends in immunology Bd. II.
Cruickshank, R. and Weir, D.M. Butterworth, London.

Campbell, F.W. und Robson, J.G. (1968). Application of fourier analysis to the visibility of gratings.
J. Physiol. 197, 551 - 566.

Cullmann, H. (1973). Ein automatisches Verfahren zur Untersuchung der Summationseigenschaften des Auges beim Farbensehen.
Diplomarbeit. Institut für med. Optik, München.

Cunningham, B.A. (1977). The structure and function of histocompatibility antigens.
Scietific American 11, 96.

Daw, N.W. (1968). Colour-coded ganglion cells in the goldfisch retina: extension of their receptive fields by means of new stimuli.
J. Physiol. 197, 567 - 592.

Donner, K.O. und Rushton, W.A.H. (1959). Rod-cone interaction in the frog's retina analysed by the Stiles-Crawford effect and by dark adaptation.
J. Physiol. 149, 303 - 317.

Dow, B.M. und Gouras, P. (1973). Color and spatial specifity of single units in the Rhesus monkey foveal striate cortex.
J. Neurophysiol. 36, 79 - 100.

Dow, B.M. (1974) Functional classes of cells and their laminar distribution in monkey visual cortex.
J. Neurophysiol. 37, 927 - 946.

Dubin, M.W.M. (1974). Anatomy of the vertebrate retina.
In: The eye, ed. by Davson, H. und Graham, L.T. Jr., Vol. 6
Academic Press - New York and London

Enroth-Cugell, C. und Robson, J.G. (1966). The contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat.
J. Physiol. 187, 517 - 552.

Gouras, P. (1972). Color opponency from fovea to striate cortex.
Invest. Ophthalmol. 11, 427 - 434.

Granger, E.M. und Heurtley, J.C. (1973). Visual chromaticity-modulation transfer function.
J. Opt. Soc. Am 63, 1173 - 1174.

Green, D.G. (1968). The contrast sensitivity of the coulor mechanisms of the human eye. J. Physiol. 196, 415 - 429.

Griffith, J.S. (1963). A field theory of neural nets: I. Derivation of field equations. Bull. of Mathematical Biophysics 25, 111 - 120.

Griffith, J.S. (1965). A field theory of neural nets: II. Properties of the field equations. Bull. of Mathematical Biophysics 27, 187 - 195.

Gröbner, W. und Hofreiter, N. (1965) und (1966). Integraltafel
Unbestimmte Integrale (1965).
Bestimmte Integrale (1966).
Springer-Verlag. Wien - New York.

Guth, S.L. (1969). On Luminance additivity and related topics.
Vis. Res. 9, 537 - 575.

Hassenstein, B. (1968). Modellrechnung zur Datenverarbeitung beim Farbensehen des Menschen.
Kybernetik 4, 209 - 223.

Helmholtz, H.L.F. v. (1886). Handbuch der physiologischen Optik.
Hamburg - Leipzig.

Horst, G.H. Ch. van der (1967). Transfer of spatial color contrast.
J. Opt. Soc.Am. 57, 1263.

Horst, G.J.Ch. can der (1969). Fourier analysis and color discrimination.
J. Opt. Soc. Am. 59, 1670 - 1676.

Horst, G.J.Ch. van der und Bouman M.A. (1969). Spatio-temporal chromaticity discrimination. J. Opt.Soc. Am. 59, 1482 - 1488.

Horst, G.J.Ch. van der, Weert, Ch.M.M. de und Bouman, M.A. (1967). Transfer of spatial chromaticity-contrast at threshold in the human eye. J. Opt.Soc. Am. 57, 1260 - 1266.

Hubel, D.H. und Wiesel, T.N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. J. Physiol. 148, 574 - 591.

Hubel, D.H. und Wiesel, T.N. (1960). Receptive fields of optic nerve fibres in the spider monkey. J. Physiol. 154, 572 - 580.

Hubel, D.H. und Wiesel, T.N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. J. Physiol. 160, 106 - 154.

Hubel, D.H. und Wiesel, T.N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. J. Physiol. 195, 215 - 243.

Hubel, D.H. und Wiesel, T.N. (1969). Visual area of the lateral suprasylvian gyrus of the cat. J. Physiol. 202, 251 - 260.

Hueckel, M.H. (1971). An operator which locates edges in digitized pictures. J. ACM 18, 113 - 125.

Hueckel, M.H. (1972). A local visual operator which recognizes edges and lines. J. ACM 20, 634 - 647.

Ingling, C.R. und Drum, B.A. (1973). Retinal receptive fields: correlations between psychophysics and electrophysiology.
Vis. Res. 13, 1151 - 1163.

Jahnke-Emde-Lösch (1960). Tafeln höherer Funktionen.
B.G. Teubner Verlagsgesellschaft. Stuttgart.

Kelly, D.H. (1974). Spatio - temporal frequency characteristics of color - vision mechanisms.
J. Opt. Soc. Am. 64, 983 - 990.

Klein, G. (1966). Tumor antigens.
Ann. Rev. Microbiol. 20, 223.

Koenderink, J.J., Grind W.A. van de und Bouman, M.A. (1972). Opponent color coding: a mechanistic model and a new metric for color space.
Kybernetik 10, 78 - 98.

Kreyszig, E. (1965). Statistische Methoden und ihre Anwendungen.
Vandenhoeck u. Ruprecht, Göttingen.

Kries, J. von (1882). Die Gesichtsempfindungen und ihre Analyse.
Leipzig.

Kuffler, S.W. (1953). Discharge patterns and functional organization of mammalian retina.
J. Neurophysiol. 16, 37 - 68.

Kulikowski, J.J. und King-Smith, P.E. (1973). Spatial arrangement of line, edge and grating detectors revealed by subthreshold summation.
Vis. Res. 13, 1455 - 1478.

Legéndy, C.R. (1975). Can the data of Campbell and Robson be explained without assuming fourier analysis?
Biol. Cybernetics 17, 157 - 163.

Legge, G.E. (1976). Adaptation to a spatial impulse: Implications for fourier transform models of visual processing. Vis. Res. 16, 1407 - 1418.

Lovegrove, W.J. (1977). Inhibition between channels selective to contour orientation and wavelength in the human visual system. Percept. Psychophys. 22, 49 - 53.

Lovegrove, W.J. und Over, R. (1973). Colour selectivity in orientation masking and after effect. Vis. Res. 13, 895 - 902.

Mac Cree, K.J. (1960). Small field tritanopia and the effects of voluntary fixation. Optica acta 7, 317 - 323.

Mac Leod, D.I.A. (1972). Rods cancel cones in flicker. Nature 235, 173 - 174.

May, J.G. (1972). Chromatic adaptation of orientation- and size-specific visual processes in man. Vis. Res. 12, 1509 - 1517.

Mc Cann, J.H. (1972). Rod-cone interactions: Different color sensations from identical stimuli. Science 176, 1255 - 1257.

Mc Collough,C. (1965). Color adaptation of edge-detectors in the human visual system. Science 149, 1115 - 1116.

Möller, E. and Möller, G. (1967). Inhibition of tumor growth by confrontation with incompatible cells. Cancer 20, 871.

Poggio, B.F., Mansfield, R.J.W. und Sillito, A.M. (1971). Functional properties of neurons in the striate cortex of the macaque monkey subserving the foveal region of the retina. Abstracts of First Annual Meeting, Society for Neuroscience, Washington, D.C., 128.

Quick, R.F. (1974). A vector - magnitude model of contrast detection. Kybernetik 16, 65 - 67.

Quick, R.F. und Reichert, I.A. (1973). Multiple - channel model of human vision: Bandwidth considerations. Kybernetik 12, 141 - 144.

Rentschler, I. (1973). Spatial summation in color - receptive pathways. Vis. Res. 13, 325 - 336.

Resnikoff, H.L. (1974). Differential Geometry and color perception. Journ. Math. Biol. 1, 97 - 131.

Richter, M. (1976). Einführung in die Farbmetrik. Sammlung Göschen. de Gruyter, Berlin - New York.

Röhler, R. (1965). Einige Zusammenhänge zwischen der mittleren Größe der Quanten in einem Lichtreiz und der Farbempfindung. Vis. Res. 5, 361 - 377.

Röhler, R. (1976). Ein Modell zur örtlich-zeitlichen Signalübertragung im visuellen System des Menschen auf der Basis der linearen Systemtheorie kontinuierlicher Medien. Biol. Cybernetics 22, 97 - 105.

Sachs, M.B., Nachmias, J. und Robson, J.G. (1971). Spatial-frequency channels in human vision. J. Opt. Sec. Am. 61, 1176 - 1186.

Schade, O.H. (1956). Optical and photoelectric analog of the eye.
J. Opt. Soc. Am. 46, 721 - 739.

Schade, O.H. (1958). J.Soc. Motion Pict. Telev. Eng. 67, 801

Schober, H. und Munker, H. (1967). Untersuchungen zu den Übertragungseigenschaften des Gesichtssinnes für die Farbinformation.
Vis. Res. 7, 1015 - 1025.

Schrödinger, E. (1920). Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen.
Annalen der Physik 63, 397 - 426, 427 - 456, 481 - 520.

Seelen, W. von (1970). Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere. I
Kybernetik 7, 43 - 60.

Seelen, W. von (1970). Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere. II
Kybernetik 7, 89 - 106.

Shapley, R.M. und Tolhurst, D.J. (1973). Edge detectors in human vision.
J. Physiol. 229, 165 - 183.

Sharpe, C.R. (1974). The colour specifity of spatial adaptation: Red-blue interactions.
Vis. Res. 14, 41 - 51.

Spekreijse, H. und Berg, I.J.T.P. van den (1971). Interaction between colour and spatial coded processes converging to retinal ganglion cells in goldfish.
J. Physiol. 215, 679 - 692.

Stiles, W.S. (1946). A modified Helmholtz line element in brightness-colour space. Proc. phys. Soc. Lond. 58, 41 - 65.

Stiles, W.S. und Wyszecki, G. (1974). Colour - matching data and the spectral absorption curves of visual pigments. Vis. Res. 14, 195 - 207.

Svaetichin, Gunnar (1956). Spectral response curves from single cones. Acta physiol. scand. 39, suppl. 17 - 46.

Thom, R. (1975). Structural stability and morphogenesis. Benjamin, W.A., Reading, Massachusetts.

Tolhurst, D.J. (1972). On the possible existence of edge detector neurones in the human visual system. Vis. Res. 12, 797 - 804.

Valois, R.L. de (1966). Analysis of response patterns of LGN-cells. J. Opt. Soc. Am. 56, 966 - 977.

Valois, R.L. de (1971). Contribution of different lateral geniculate cell types to visual behavior. Vis. Res. Suppl. 3, 383 - 396.

Valois, R.L. de (1972). Processing of intensity and wavelength information by the visual system. Invest. Opthalmol. 11, 417 - 426.

Valois, R.L. de (1973). Central mechanisms of color vision. In: Central Visual Information A, ed. R. Jung, Berlin: Springer, 209 - 253.

Vos, J.J. und Walraven, P.L. (1970). On the derivation of the foveal receptor primaries. Vis. Res. 11, 799 - 818.

Vos, J.J. und Walraven, P.L. (1972). An analytical description of the line element in the zone-fluctuation model of colour vision. I. Basic concepts. Vis. Res. 12,

Vos, J.J. und Walraven, P.L. (1972). An analytical description of the line element in the zone-fluctuation model of colour vision. II. The derivation of the line element. Vis. Res. 12, 1345 - 1365.

Wagner, H.G., Mac Nichol, E.F. und Wolbarsht, M.L.(1963). Functional basis for "on"-center and "off"-center receptive fields in the retina. J. Opt. Soc. Am. 53, 66 - 70.

Wald, G. und Gibbons, I. (1963). The problem of visual excitation. J. Opt. Soc. Am. 53, 20 - 35.

Wald, G. (1964). The receptors of human colour vision. Science 145, 1007 - 1017.

Wald, G. (1967). Blue blindness in the normal fovea. J. Opt. Soc. Am. 57, 1289 - 1303.

Walraven, P.L. (1962). On the mechanisms of colour vision. Soesterberg.

Westheimer, G. (1970). Rod-cone independence for sensitizing interaction in the human retina. J. Physiol. 206, 109 - 116.

White, K.D. (1977). Summation of successively established orientation-contingent color after effects. Percept. & Psychophys. 22, 123 - 136.

Whitten, D.N. und Brown, K.T. (1973). The time courses of late receptor potentials from monkey cones and rods.
Vis. Res. 13, 107 - 135.

Wiesel, T.N. und Hubel, D.H. (1966). Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the resus monkey.
J. Neurophysiol. 29, 1115 - 1156.

Wilson, H.R. und Cowan, J.D. (1972). Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons.
Biophys. J. 12, 1 - 24.

Wilson, H.R. und Cowan, J.D. (1973). A mathematical theory of the funcional dynamics of cortical and thalamic nervous tissue.
Kybernetik 13, 55 - 80.

Yarbus, A.L. (1967). Eye movements and vision.
Plenum Press. New York.

Yund, E.W. und Armington, J.C. (1975). Color and brightness contrast effects as a function of spatial variables.
Vis. Res. 15, 917 - 929.

Zeki, S.M. (1973). Colour coding in rhesus monkey prestriate cortex.
Brain Research 53, 422 - 427.

11. ANHÄNGE

11.1 ANHANG I

Der Vollständigkeit wegen soll der Fehler abgeschätzt werden, der bei der Integralformel von Dawson entsteht, wenn die untere Integrationsgrenze 0 durch ein $\varepsilon \geq 0$ ersetzt wird. Für ein $\varepsilon \geq 0$ gilt für die tatsächlich angewendeten Integrale erstens:

$$\lim_{\varepsilon \to 0} \int_{\varepsilon}^{\infty} e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt = \frac{1}{\sqrt{a}}\, e^{-\frac{x^2}{a}} \lim_{\varepsilon \to 0} \int_{\varepsilon}^{x\sqrt{a}} e^{t^2}\, dt$$

es ergibt sich also das Dawson Integral als Grenzwert.

Zweitens gilt für ein $\varepsilon \geq 0$:

$$\int_0^{\infty} e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt = \int_0^{\varepsilon} e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt + \int_{\varepsilon}^{\infty} e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt$$

Die Differenz zwischen dem wahren Wert und dem angenommenen Wert des Integrals ergibt sich somit zu:

$$\int_0^{\infty} e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt - \int_{\varepsilon}^{\infty} e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt = \int_0^{\varepsilon} e^{-at^2} \sin(2xt)\, dt \leq \varepsilon \cdot 1$$

Analog gilt für ein $\varepsilon \geq 0$ für die andere Seite der Integralformel von Dawson:

$$\frac{1}{\sqrt{a}}\, e^{-\frac{x^2}{a}} \int_0^{x\sqrt{a}} e^{t^2}\, dt = \frac{1}{\sqrt{a}}\, e^{-\frac{x^2}{a}} \left\{ \int_0^{\varepsilon} e^{t^2}\, dt + \int_{\varepsilon}^{x\sqrt{a}} e^{t^2}\, dt \right\}$$

Die Differenz zwischen dem wahren und angenommenen Wert des Integrals ergibt sich wieder zu:

$$\frac{1}{\sqrt{a}}\, e^{-\frac{x^2}{a}} \left\{ \int_0^{x\sqrt{a}} e^{t^2}\, dt - \int_{\varepsilon}^{x\sqrt{a}} e^{t^2}\, dt \right\} = \frac{1}{\sqrt{a}}\, e^{-\frac{x^2}{a}} \int_0^{\varepsilon} e^{t^2}\, dt \leq$$

$$\leq \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot 1 \cdot \varepsilon \cdot e^{\varepsilon^2} \underset{\varepsilon < 1}{\leq} \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot 1 \cdot \varepsilon \cdot e = \frac{e}{\sqrt{a}} \cdot \varepsilon$$

Die gemachten Fehler sind also kleiner als ε- mal ein konstanter Faktor, solange $\varepsilon < 1$ ist.

11.2 ANHANG II

Die Ergebnisse lassen sich unter Anwendung der Fouriertechnik auch mit einer Schar von Farbgitterempfindlichkeitsfunktionen approximieren. Dabei sind die Filterbreiten abhängig von der Musterverteilung. Wie bei der ersten Modellüberlegung eignen sich wieder Tiefpaßfilter als Ansatz. Da man an dem Koordinatenursprung mit einer Singularität zu rechnen hat, schränkt man den Integrationsbereich entweder ein, oder man läßt $S_g(f,x_o)$ geeignet gegen Null gehen. Nachdem in Abschnitt 5.2 erstere Methode angewendet wurde, soll nun nach dem zweiten Ansatz vorgegangen werden. Im folgenden sei $\varepsilon > 0$ sonst aber beliebig und x_o beschreibe die Lage der Farbkante. Die Farbgitterempfindlichkeitsfunktion $S_g(f,x_o)$ sei folgendermaßen definiert:

$$S_g(f,x_o) = \begin{cases} p(f) & 0 \le f \le \varepsilon \\ \cos\left[2\pi x_o (f-\varepsilon)\right] & \varepsilon < f < f_1 \\ 0 & f_1 \le f < \infty \end{cases}$$

f_1 sei zunächst einfach eine Konstante, die später geeignet bestimmt wird. $p(f)$ ist so definiert, daß $S_g(f,x_o)$ stetig differenzierbar wird:

$$p(f) = -\frac{2}{\varepsilon^3} f^3 + \frac{3}{\varepsilon^2} f^2$$

Für $R(x_o)$ gilt bekanntlich (vgl. 5.2):

$$R(x_o) = \int_0^\infty S_g(f,x_o) \, \frac{\cos 2\pi x_o f}{2\pi f} \, df$$

also:

$$R(x_o) \approx \int_0^\varepsilon p(f) \, \frac{\cos 2\pi x_o f}{2\pi f} \, df + \int_\varepsilon^{f_1} \frac{\cos^2 2\pi x_o f}{2\pi f} \, df + \int_{f_1}^\infty 0 \cdot \frac{\cos 2\pi x_o f}{2\pi f} \, df$$

Der letzte Term fällt weg. Der erste Term kann mit einem beliebig kleinem Fehler (bei geeigneter Wahl von ε) vernachlässigt werden, da $p(f) \cdot \frac{\cos 2\pi x_o f}{2\pi f}$ für $0 \le f \le \varepsilon$ und $f \to 0$ gegen Null geht und in diesem Bereich beschränkt ist. Der mittlere Term ergibt sich aus der Näherung:

$$\cos x \cos(x+\varepsilon) \approx \cos^2 x \quad \text{für } \varepsilon > 0 \text{ aber } \varepsilon \ll 1$$

Also gilt näherungsweise:

$$R(x_0) = \int_{\varepsilon}^{f_1} \frac{\cos^2 2\pi x_0 f}{2\pi f}\, df$$

Daß diese Funktion bis auf eine Normierungskonstante tatsächlich die Versuchsergebnisse beschreibt, erkennt man (wie bei vielen anderen Fällen) leichter, wenn die Ableitung dieser Funktion betrachtet wird.

$$(*)\quad R'(x_0) = -2 \int_{\varepsilon}^{f_1} \cos a' f \sin a' f\, df = -\frac{1}{a'} \sin^2 a' f \Big|_{\varepsilon}^{f_1} = -\frac{\sin^2(2\pi x_0 f)}{2\pi x_0}\Big|_{\varepsilon}^{f_1}$$

mit $a' = 2\pi x_0$ und $x_0 \geq \varepsilon$ (hier und im folgenden Teil).

Dann gilt wieder:

$$R'(x_0) = -\frac{1}{2\pi x_0} \left[\sin^2(2\pi x_0 f_1) - \sin^2(2\pi x_0 \varepsilon) \right]$$

und näherungsweise mit geeignetem $\varepsilon > 0$ aber $\varepsilon \ll 1$:

$$R'(x_0) \approx -\frac{1}{2\pi} \frac{\sin^2(a x_0)}{x_0} \quad \text{mit} \quad a = 2\pi f_1$$

Wird angenommen, daß zu der Kantendetektion der Bereich B lateral herangezogen wird, dann gilt:

$$R(x_0) = -\frac{1}{2\pi} \int_{B}^{x_0 \geq \varepsilon} \frac{\sin^2(a x_0)}{x_0}\, dx_0 = -\frac{1}{2\pi a} \int_{aB}^{a x_0 \geq a\varepsilon} \frac{\sin^2 z}{z}\, dz$$

Dieses Integral läßt sich mittels der Integraltafel von Gröbner und Hofreiter und den Tafeln von Jahnke-Emde-Lösch auswerten.

Im folgenden wurde aber das Verhalten dieses Modellansatzes für den Fall untersucht, in dem f_1 eine Funktion der Farbkantenlage x_0 ist: $f_1 = f_1(x_0)$.

In diesem Fall hat man die Gleichung $(*)$ auf der rechten Seite folgendermaßen zu ergänzen:

$$R'(x_0) = -2 \int_{\varepsilon}^{f_1(x_0)} \cos a' f \sin a' f\, df + f_1'(x_0) \frac{\cos^2[2\pi x_0 f_1(x_0)]}{2\pi f_1(x_0)}$$

mit $a' = 2\pi x_o$

Für $f_1(x_o)$ wurden die folgenden Ansätze ausprobiert:

a) $$f_1(x_o) = \frac{1}{4x_o}$$

Mit den oben ausgeführten Näherungen folgt dann:

$$R'(x_o) = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\sin^2\left[2\pi x_o \left(\frac{1}{4x_o}\right)\right]}{x_o} - \frac{1}{4x_o^2} \cdot \frac{\cos^2\left[2\pi x_o \left(\frac{1}{4x_o}\right)\right]}{2\pi \cdot \frac{1}{4x_o}}$$

$$R'(x_o) = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{x_o}$$

und entsprechend:

$$R(x_o) = -\frac{1}{2\pi} \int_{B}^{x_o \geq \varepsilon} \frac{1}{x_o}\, dx_o = -\frac{1}{2\pi} \left[\ln x_o - \ln B \right]$$

Die normierte Modellkurve ist in Abb. 19a) eingetragen. Die Tiefpaßfilter für diesen Ansatz lassen sich in Abhängigkeit der Farbkantenlage x_o folgendermaßen darstellen:

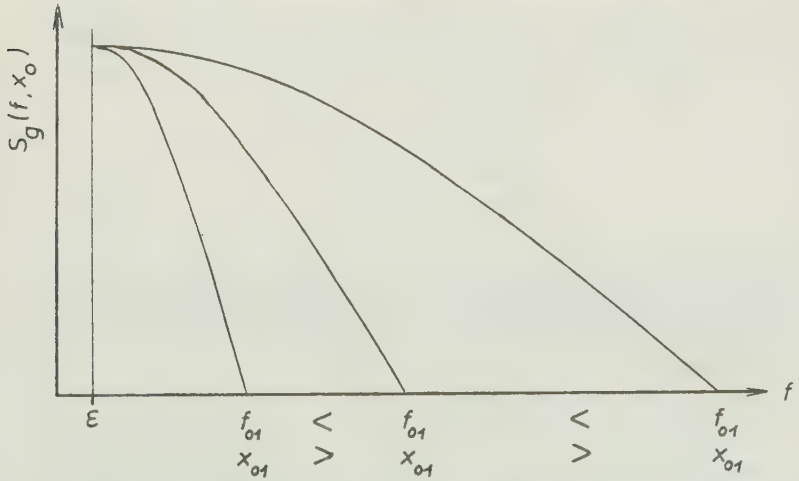


Abb. 35 Hier sind für verschiedene Farbkantenlagen x_{01}, x_{02}, x_{03} die entsprechenden Tiefpässe dargestellt. Die Tiefpaßbreite wird also um so schmäler, je breiter das Ortsmuster ist. Der Anteil der Gitterempfindlichkeitsfunktion für $f \leq \varepsilon$ ist nicht dargestellt, da Empfindlichkeiten für Ortsfrequenzen dieser Größenordnung experimentell ohnehin nicht nachweisbar wären.

b) $f_1(x_o) = \frac{1}{x_o}$

Damit folgt für $R'(x_o)$ die folgende Beziehung

$$R'(x_o) = -\frac{1}{2\pi}\frac{\sin^2\left[2\pi\left(\frac{1}{x_o}\right)x_o\right]}{x_o} - \frac{1}{x_o^2}\frac{\cos^2\left[2\pi x_o\left(\frac{1}{x_o}\right)\right]}{2\pi\cdot\frac{1}{x_o}}$$

$$R'(x_o) = 0 - \frac{1}{2\pi}\cdot\frac{1}{x_o}$$

Es ergibt sich also die gleiche Modellantwortkurve wie in dem Fall a).

Die "Tiefpaßfilter" haben in diesem Fall jedoch das folgende Aussehen:

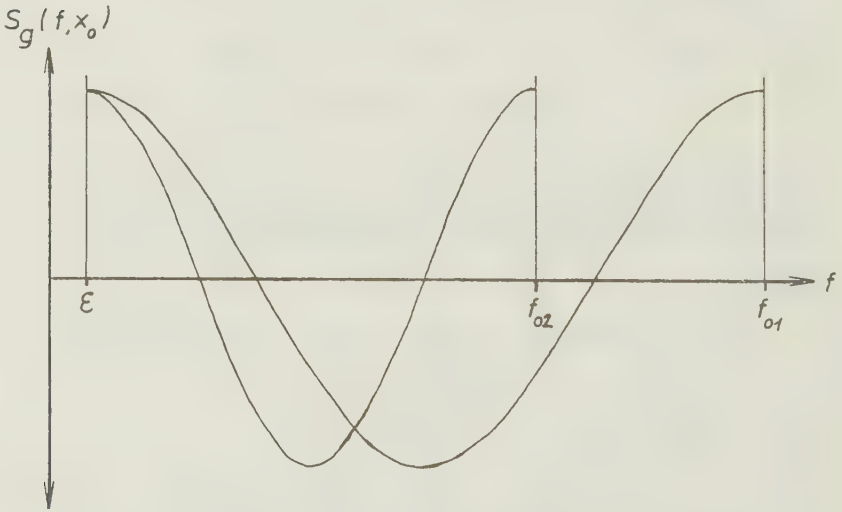


Abb. 36 Auffallend ist hier das Auftreten negativer Farbgitterempfindlichkeiten. Wieder ist die Grenzfrequenz f_1 und damit die Tiefpaßbreite um so kleiner, je größer der Abstand der Farbgitterkante wird.

Die negativen Werte der Farbgitterempfindlichkeitsfunktion entsprechen einer Kontrastumkehr und sind ein Hinweis auf di antagonistische Farbverarbeitung.

11.3 Anhang III

In diesem Anhang wird gezeigt, wie man ein äquiluminantes Farbmuster nach der Fouriermethode entwickelt.

Das Prinzip dieser Entwicklung besteht darin, daß die Amplituden der Basisfunktionen (cos, sin) nicht, wie bei der fourieranalytischen Zerlegung eines reinen Helligkeitsmusters üblich, als Leuchtdichtegrößen interpretiert werden, sondern als Chromatizitätsgrößen.

Dazu legt man in das Testfeld der Abb. 1 ein Koordinatensystem (Abb. 37). Wegen der Achsensymmetrie (bezüglich der x-Achse) beschränkt man sich im weiteren Verlauf auf die eindimensionale Fouriertransformation.

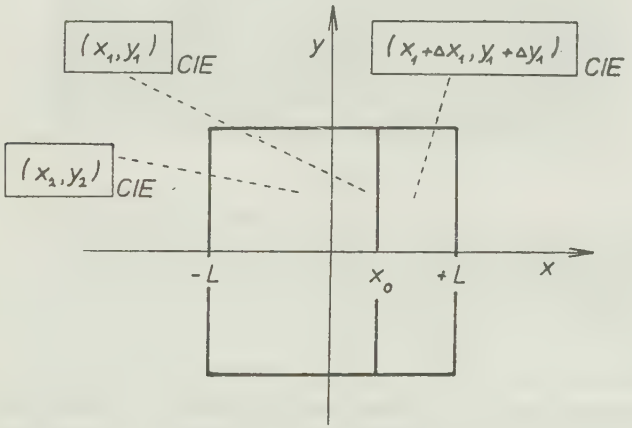


Abb. 37 In eine der Abb. 1 entsprechende Testfeldanordnung legt man ein Koordinatensystem, welches die räumliche Verteilung der Farben beschreibt. Die Zahlenpaare in den Kästchen beschreiben den Farbton in CIE-Koordinaten.

Bei Einstellung der beiden Testfeldhälften auf Farbgleichheit gilt demnach bei nicht vorhandenem Induktionsfeld (in CIE-Koordinaten): $(x_1, y_1) = (x_2, y_2)$. Die dem Paar (x_1, y_1) zugeordnete Farbe wurde in der Abb. 38 mit C bezeichnet. Da diese Farbe aus Mischung der roten und grünen Farbe R und G entsteht, liegt C auf der Verbindungsstrecke zwischen R und G.

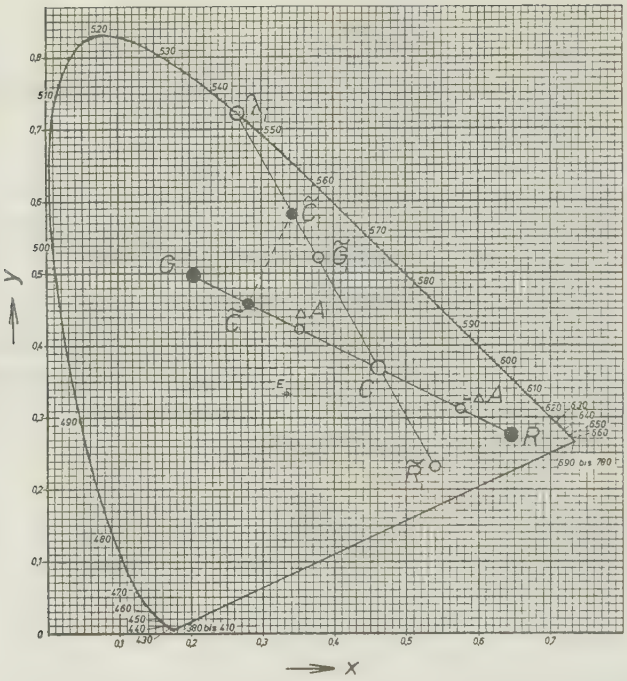


Abb. 38 Stellt man die beiden Testfeldhälften (durch geeignetes Mischungsverhältnis der Filter R und G) auf Gleichheit ein, so beschreibt C die Testfeldfarbe. Durch Überlagern des Induktionsfeldes erhält man in dem betroffenen Gebiet den Farbton $\tilde{C}_i$ bzw. $\tilde{C}$ (vgl. Text).

Überlagert man dem rechten Halbfeld im Punkt x_o eine monochromatische ($\lambda = \lambda_i$) Induktionshalbfläche, so verschiebt sich der Farbton des überlagerten Feldbereiches zu dem Farbpunkt $\tilde{C}_i$. (Bei Einstellen auf Gleichheit kompensiert man übrigens die Wirkung des Induktionsfeldes, indem sich die Grundfarbe des Testfeldes von C nach R hin verschiebt.) Da die Farbänderung von C zu $\tilde{C}_i$ unterschwellig ist, ist erst recht der Farbunterschied zwischen $\tilde{C}_i$ und $\tilde{C}$ unterschwellig, und man vereinbart, daß sich durch Überlagern des Induktionsfeldes der Farbton näherungsweise zu $\tilde{C}$ $(x_1+\Delta x_1,\ y_1+\Delta y_1)$ verschiebt. (Bei Verzicht auf diese Näherungen würden die folgenden Ausführungen ebenfalls streng gelten, wenn man nur die neuen Filterfarben $\tilde{R}_i$ und $\tilde{G}_i$ anstelle der R und G einführte.)

Für die Farbtonverschiebung gilt: $\Delta C = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2}$.
Bewegt man sich "dipolförmig" auf der Strecke RG von C bis A_o und dann zurück nach $-A_o$ usw., so ändert sich der resultierende Farbton periodisch mehr zu Rot bzw. Grün. Da in der Testfeldanordnung der Abb. 37 das Farbmuster symmetrisch zur x-Achse ist, läßt sich das Farbmuster der

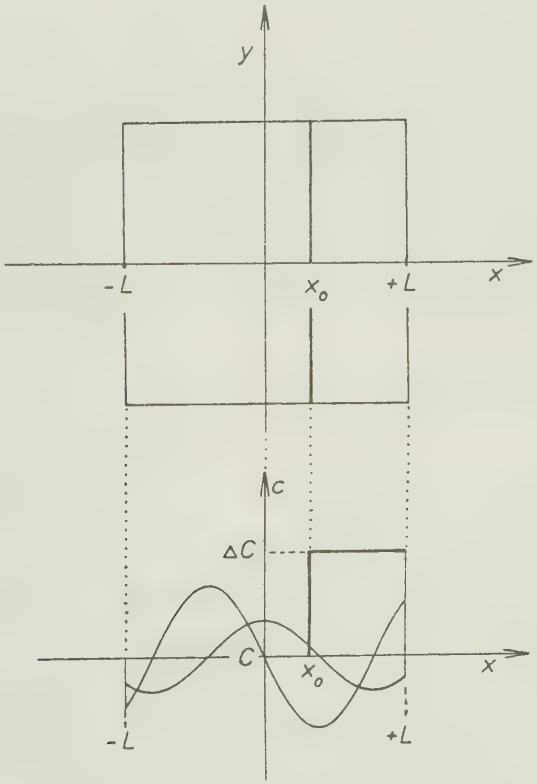


Abb. 39 Im unteren Koordinatensystem sind an der Ordinate der Farbton (C) und die Farbtonänderung zu ($\widetilde{C}$) der Testfeldanordnung aufgetragen. Den Sinus- und Kosinusfunktionen entsprechen im Testfeld also sinus- bzw. cosinusförmig farbmodulierte Balken. Je größer die Amplituden A sind, um so mehr verschiebt sich in den Balken der Testfeldanordnung der Farbton C nach Grün bzw. Rot.

Testfeldanordnung entsprechend dem unteren Bildteil der Abb. 39 darstellen. Die Ordinate bestimmt dabei die Farbtonänderung. Im unteren Koordinatensystem ist demnach bei x_o die Induktionskante ΔC. Den im unteren Koordinatensystem eingetragenen sin- bzw. cos - Funktionen entsprechen im oberen Bildabschnitt farbmodulierte und zur Trennkarte parallele sin- bzw. cos-Gitter. Nach diesen läßt sich das Farbmuster entwickeln.

Da ein "physiologischer Detektor" nur auf Sinus- oder Kosinuskomponenten abgestimmt sein kann - sonst würde er ja ständig "feuern" -, berücksichtigt man beim Kantendetektor nur die Sinuskomponenten. Ersetzt man in Abb. 18 b) nämlich die Leuchtdichtekanten und leuchtdichtemodulierten Gitter durch Farbkanten und farbmodulierte Gitter, so ist die Empfindlichkeit bei einer Phase von $\frac{\pi}{2}$ ebenfalls am größten, bei einer Phase von 0 bzw. π am kleinsten. Man hat also einen Detektor vom "Sinustyp" vor sich und berechnet bei der Entwicklung nach der Fouriermethode demnach nur die Sinuskomponenten.

Für ein eindimensionales Farbmuster C(x) mit:

$$C(x) = \begin{cases} C & -L \leq x < x_o \\ C+\Delta C & x_o \leq x \leq L \\ 0 & sonst \end{cases}$$

also gilt:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |C(x)|\,dx < \infty$$

ergibt sich für die Sinuskomponenten B(f):

$$B(f) = 2\int_{-\infty}^{+\infty} C(x)\,\sin(2\pi f x)\,dx = \underbrace{2\cdot C\int_{-L}^{+L}\sin(2\pi f x)\,dx}_{=0} + 2\cdot\Delta C\int_{x_o}^{L}\sin(2\pi f x)\,dx$$

und

$$B(f) = -\frac{\Delta C}{\pi\cdot f}\cos(2\pi f\cdot L) + \frac{\Delta C}{\pi\cdot f}\cos(2\pi\cdot f\cdot x_o)$$

Da in Abschnitt 5.2.gezeigt wird, daß die Systemantwort $R(x_o)$ des Kantendetektors auf eine Kante bei x_o durch $R(x_o) = \int_{0.01}^{30} S_g(f)\cdot B(f)df$ gegeben ist, liefert das erste Term von B(f) lediglich eine von der Testfeldgröße L abhängige Konstante. Da diese Konstante wegen der späteren Normierung den Kurvenverlauf nicht beeinflußt, vernachläßigt man bei den weiteren Untersuchungen den ersten Term.

```
C
C
C
C     PROGRAMM ZUM INTERPOLIEREN UND ZEICHNEN DER
C     ===========================================
C
C
C           EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE
C           ==========================
C
C
C
C
      DIMENSION X(20),Y(20),DY(20)
      DIMENSION FG(2)
      DIMENSION CL(30,30),P(30)
C
      EXTERNAL THEORY
C
      URF=0.0
C
      DATA RNA/0.0/
      DATA L/1/
      DATA ND,NZ/7,2/
      DO   1500   K=1,2
      READ(5,170)   P(K)
 1500 CONTINUE
C
      P(1)=5400./P(1)
      P(2)=P(2)*5400.
      READ(5,400)       NZ,ND
  400 FORMAT(2I5)
  140 FORMAT(F5.1)
 1100 FORMAT(3I2)
      CALL GZEICH(ND)
      NPL=(ND-1)*10
      DO   100   M=1,NZ
      L=M +1
C
      READ(5,1100)   MI,MZ,MV
      READ(5,10)    N
      READ(5,150)    TP
      READ(5,140)   W
      READ(5,160)                (FG(I),I=1,2)
      READ(5,20)       (X(I),Y(I),DY(I),I=1,N)
C
C
      WRITE(6,110)
      WRITE(6,40)
      WRITE(6,60)      TP
      WRITE(6,70)           FG(1),FG(2)
      WRITE(6,80)   W
      WRITE(6,90)
      WRITE(6,120)     (X(I),Y(I),DY(I),I=1,N)

   10 FORMAT(I2)
   20 FORMAT(3F8.3)
```

```
   40 FORMAT(1HO,'  NORM. FARBKONTRASTFUNKTION          '    )
   60 FORMAT(1HO,'    TESTPERSON  :     ',   A2    '
   70 FORMAT(1HO,'    FELDGROESSE IN GRAD  :',  5X,F5.2,'*',F5.2    )
   80 FORMAT(1HO,'    WELLENLAENGE IND.HALBFELD IN NM  :   ',F6.1    )
   90 FORMAT(1HO,' ABSTAND D IND.KANTE VON TRENNK. (IN MIN.) : ',9X,'NOR
     1M. KONTRASTWERT : ')
  110 FORMAT(1H1,'       ')
  120 FORMAT(1H ,44X,F6.2,29X,F6.3,' + ODER - ',F5.3)
  130 FORMAT(3F5.2)
  150 FORMAT(A2)
  160 FORMAT(2F5.2)
  170 FORMAT(F5.2)
C
      IF(MZ.LE.0)   GOTO   1300
      DO   200   J=1,N
      XH=X(J)*0.2
      YH=Y(J)*10.
      CALL SYMBOL(XH,YH,0.60,L,270.,-1)
      IF (DY(J).LE.0.06)   GOTO   200

      DO   300   K=1,2
      XNG=X(J)*0.2
      YNG=(Y(J)+0.03*(-1)**(K+1))*10.
      CALL PLOT(XNG,YNG,+3)
      YNG=(Y(J)+DY(J)*(-1)**(K+1))*10.
      CALL PLOT(XNG,YNG,+2)
      XNG=XNG-0.3
      CALL PLOT(XNG,YNG,+2)
      XNG=XNG+0.6
      CALL PLOT(XNG,YNG,+2)
  300 CONTINUE
  200 CONTINUE
      YNU=-3.0-RNA
      XNU=ND*2.-.5
      CALL SYMBOL(XNU,YNU,0.52,L,270.0,-1)
      XNU=XNU+.5
      YNU=YNU-0.2
      IF(MV.LT.2)   GOTO   1200
      IF(MV.EQ.2)    CALL SYMBOL(XNU,YNU,0.35,
     1 25H MEAN OF TWO OBSERVERS     ,0.,+25)
      IF(MV.EQ.3)   CALL SYMBOL(XNU,YNU,0.35,
     1 25H MEAN OF THREE OBSERVERS   ,0.,+25)
      GOTO   1400
 1200 CALL SYMBOL( XNU,YNU   ,0.35,12H  OBSERVER        ,0.,14)
      CALL SYMBOL(999.0,999.0,0.35,TP,0.,+2)
      CALL SYMBOL(999.,999.,.35,2CH
     1                    ,0.,+20)



 1400 RNA=RNA+0.9
 1300  IF(MI.LE.0)  GOTO   100
 5000 CALL FIT(THEORY,URF,N,X,Y,DY,2,P,CL,&5000)
  500 WRITE(6,600)
  600 FORMAT(1H1,' NO  FAILURE  EXIT  ')
  900 FORMAT('1'///,'    ')
      WRITE(6,900)
      XH=0.0
      CALL PLOT(0.0,10.,+3)
      DO   700   IA=1,NPL
```

```
      CALL THEORY(IA,XH,P,F,DF)
      XA=XH*0.2
      YA=F*10.
      CALL PLOT(XA,YA,+2)
      WRITE(6,800)    XH,F
  800 FORMAT(1HO,2F10.2)
      XH=XH+1.
  700 CONTINUE

C
C
  100 CONTINUE
C
C

      CALL PLOT(1.,-7.,+3)
      CALL SYMBOL(999.,999.,0.35,25H  SIZE OF TESTFIELD :       ,0.,+25)
      CALL NUMBER(999.,999.,0.35,FG(1),0.,1)
      CALL SYMBOL(999.,999.,0.35,3H *  ,0.,+3)
      CALL NUMBER(999.,999.,0.35,FG(2),0.,1)
      CALL SYMBOL(999.,999.,0.35,23H   [DEGREE OF ANGLE]         ,0.,+23)
      CALL PLOT(1.,-6.,+3)
      CALL SYMBOL(999.,999.,0.35,23H  WAVELENGTH IN NM :     ,
     1  0.,+23)
      CALL NUMBER(999.,999.,.35,W,0.,+1)

      STOP
      END
C
C
C
      SUBROUTINE GZEICH(ND)
      REAL NB,NA
      CALL PLOT(5.,10.,-3)
      NA=10.
      DO   10   I=1,ND
      CALL PLOT(2.,0.,-2)
           PLOT(        + )
      CALL PLOT(-0.8,-1.15,+3)
      CALL PLOT(-0.75,-0.85,+3)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.35,NA,0.0,1)
      CALL PLOT(0.,0.,+3)
      NA=NA+10.
   10 CONTINUE
      DO   20   I=1,5
      CALL PLOT(2.,0.,-2)
   20 CONTINUE
      CALL SYMBOL(-8.50,-1.15,0.42,26H DISTANCE D                ,0.,26)
      CALL SYMBOL(-8.50,-1.75,0.42,26H [MIN. OF ANGLE]           ,0.,26)
      XN=-(ND+5)*2.
      CALL PLOT(XN,0.,-3)
      NB=.2
      DO   30   I=1,5
      CALL PLOT(0.,2.,-2)
      CALL PLOT(-.2,0.,+2)
      CALL PLOT(-1.70,-0.20,+3)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.35,NB,0.0 ,2)
      CALL PLOT(0.,0.,+3)
      NB=NB+.2
   30 CONTINUE
      DO   40   I=1,3
```

```
      CALL PLOT(0.,1.,-2)
   40 CONTINUE
      CALL SYMBOL(-2.1,-12.5,0.42,2OHNORMAL. SENSITIVITY OF S-EDGE ,
     190.,30)
      CALL PLOT(0.,-13.,-3)
      NB=-.2
      DO   50   I=1,3
      CALL PLOT(0.,-2.,-2)
      CALL PLOT(-.2,0.,+2)
      CALL PLOT(-2.0 ,-0.20,+3)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.35,NB,0.0 ,2)
      CALL PLOT(0.,0.,+3)
      NB=NB-.2
   50 CONTINUE
      DO   60   I=1,1
      CALL PLOT(0.,-1.,-2)
   60 CONTINUE
      CALL PLOT(0.,7.,-3)
      RETURN
      END
C
C
C
      SUBROUTINE VERSUC(I,XH,P,F,DF)
      DIMENSION P(30),DF(30)
      PI=3.141593
      XH=XH/60.
      E0=-PI*P(1)**2*XH**2
      U=EXP(E0)
      E1=-PI*P(3)**2*(XH-P(4))**2
      V=EXP(E1)
      E2=-PI*P(3)**2*(XH+P(4))**2
      E3=-PI*P(3)**2*P(4)**2
      W=EXP(E2)
      XK=(1.+P(2)*P(3)*2.*EXP(E3))/P(1)
      F=XK*P(1)*U-P(2)*P(3)*(V+W)
      DF(1)=XK*U*(1.+2.*E0)
      DF(2)=-P(3)*(V+W)
      DF(3)=P(2)*V*(-1.-2.*E1)+P(2)*W*(-1.-2.*E2)
      DF(4)=-P(2)*P(3)*2.*PI*P(3)**2*((XH-P(4))*V-(XH+P(4))*W)
      XH=XH*60.
      RETURN
      END
C
C
C
      SUBROUTINE THEORY(I,XH,P,F,DF)
      DIMENSION P(30),DF(30)
      PI=3.141593
      XH=XH/60.*PI/180.
      XN=1.+P(2)*XH**2
      XC=COS(P(1)*XH)
      F=XC**2/XN
      DF(1)=-2.*XH*XC*SIN(P(1)*XH)/XN
      DF(2)=-2.*XH**2*XC**2/XN**2
       XH=XH/PI*60.*180.
      RETURN
      END
```

```
C
C            PROGRAMM ZUR BERECHNUNG DER FARBGITTEREMPF.KEITSFUNKTION
C            ========================================================
C
C                     DES FARBKANTENDETEKTORS
C                     =======================
C
C
C
      DIMENSION XZ(17),FZ(17),GZ(17),DFZ(17),GXZ(17)
      COMMON XO,PI,H,U,G,XH
      EXTERNAL FI,FI1
C
C
      XO=0.0
      PI=3.141593
      U=.02
      GXO=0.05
      STEPX=PI/90.
      STEPU=0.18
      READ(8,10)   G,H
      RXO1=AINTEG(FI1,XO,.4887,.0001)
C
      DO   20   K=1,15
      RXO=AINTEG(FI1,XO,.4887,.0001)
      RXO=RXO/RXO1
      XZ(K)=XO*180./PI
      XZOO=XZ(K)
      FZ(K)=RXO
      DFZ(K)=.0001
      GXZ(K)=GXO
      GZ(K)=EXP(-GXO**2*H)
      GZOO=GZ(K)
      WRITE(9,30)   XZOO,RXO
      WRITE(9,30) GXO,GZOO
      XO=XO+STEPX
      GXO=GXO+STEPU
20    CONTINUE
C
10    FORMAT(2F6.2)
30    FORMAT(2F12.4)
C
      CALL SELFSC(0.,45.,0.,1.5)
      CALL PSPLIN(XZ,FZ,DFZ,15,1,+005,
     1 40HADAPTATION OF THE MODEL TO EXP. FINDINGS ,
     2  32H SEPARATION OF SUBTHRESHOLD EDGE,
     3  28H NORMALIZED EDGE SENSITIVITY )
      CALL SELFSC(.01,10.0,0.,1.5)
      CALL PSPLIN(GXZ,GZ,DFZ,15,1,+105,
     1  4CH GRATING SENSITIVITY OF THE C-G DETECTOR   ,
     2  28H    SPATIAL FREQUENCY  [CPD],
     3  29H   COLOUR GRATING SENSITIVITY )
C
      STOP
      END
C
C
C
      REAL FUNCTION FI(T)
      COMMON XO,PI,H,U,G,XH
```

```
      A1=EXP(-T**2*H)
      A2=SIN(2.*PI*T*XH)
      FI=A1*A2
      RETURN
      END
C
C
C
      REAL FUNCTION FI1(X)
      COMMON XO,PI,H,U,G,XH
      EXTERNAL FI
      XH=X
      FI2=DCADRE(FI,U,G,.0001,.00001,ERROR,IER)
      FI1=FI2
      RETURN
      END
```

```
C
C
C                    TESTPROGRAMM
C
C                  ================
C
C
C
      REAL IH1(50),IH2(50)
      REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
      DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
      COMMON XO,XN,EH1,IH1,IH2,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
      COMMON ROE,ROI,TLE,TLI,LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
C
      COMMON   SE,SI,DAI,DBI
C
      EXTERNAL F

      XO=170.
      STEPX=10.
      TLE=5.
      TLI=0.
      LE1=200.
      LE2=800.
      LI1=200.
      LI2=800.
      ROE=1.
      ROI=1.
      T1=0.
      H=0.06
      EPS=0.00001
      MUE=10.
      NUEE=0.5
      THETAE=9.0
      NUEI=.3
      THETAI=17.
      BEE=1.5
      SIGEE=40.
      BIE=1.35
      SIGIE=60.
      BEI=1.35
      SIGEI=60.
      BII=1.8
      SIGII=30.
      PAUX2=H
C
C
C
      READ(5,40)   NFALL,NJ,NX,PAUX
   40 FORMAT(2I2,I3,F4.2)
      IF(NFALL.NE.0)   GO   TO   240
      XH(1)=XO
      EH1(1)=0.
      IH1(1)=0.

      DO   20   I=2,50
      EH1(I)=0.
      IH1(I)=0.
      XH(I)=XH(I-1)+STEPX
   20 CONTINUE
```

```
C
C
      GO   TO   180
  240 READ(1,220)   (XH(K),EH1(K),IH1(K),K=1,50)
  220 FORMAT(3F16.3)
      READ(1,260)   T1,H
  260 FORMAT(2F16.3)
C
  180 DO   100   J=1,NJ
      DO   80   I=1,NX
      XG=XH(I)
      Y(1)=EH1(I)
      Y(2)=IH1(I)
      IF(I.GT.1)   HAUX2=HT
      HT=H
      IG=I
      TT=T1

      CALL DIFSY1(2,F,EPS,HT,TT,Y,! 80)

   60 FORMAT(1I10,5F16.3)
   70 FORMAT(4F12.3)
      IF(J.EQ.NJ)   WRITE(6,70)   SE,SI,DAI,DBI
      IF(J.EQ.NJ)  WRITE(6,60)   I,XH(I),Y(1),Y(2),T1,HT

      HAUX1=AMIN1(HAUX2,HT)
      EH2(I)=Y(1)
      IH2(I)=Y(2)
   80 CONTINUE
C
      DO   120   K=1,NX
      EH1(K)=EH2(K)
      IH1(K)=IH2(K)
  120 CONTINUE
      KP=NX+1
      DO   140   K=KP,50
      EH1(K)=EH2(NX)
      IH1(K)=IH2(NX)
  140 CONTINUE
C
      T1=T1+H
      H=FAUX*HAUX1
C
      IF(J.EQ.NJ)   WRITE(2,220)   (XH(K),EH1(K),IH1(K),K=1,50)
      IF(J.EQ.NJ)   WRITE(2,260)  T1,H
C
C
  100 CONTINUE
C
C
      STOP
      END

      SUBROUTINE F(TT,YY,DYYDTT)
      REAL IH1(50),IH2(50)
      REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
      DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
      DIMENSION  YY(2),DYYDTT(2)
      COMMON XG,XH,EH1,IH1,IG,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
```

```
      COMMON RCE,RCI,TLE,TLI,LE1,LL2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
C
      COMMON   SE,SI,DAI,DBI
C
      EXTERNAL   FEE,FIE,FEI,FII,PXG,QXG
C
      ALPHA=.1
      RE=1.
      RI=1.
      EPS=.0001
C
C
      IF(YY(1).NE.EH1(IG))  GO   TO   20
      IF(YY(2).NE.IH1(IG))  GO   TO   20
      AEE=AINTEG(FEE,XG-1.*SIGEE,XG+1.*SIGEE,EPS)
      AIE=AINTEG(FIE,XG-1.*SIGIE,XG+1.*SIGIE,EPS)
      AEI=AINTEG(FEI,XG-1.*SIGEI,XG+1.*SIGEI,EPS)
      AII=AINTEG(FII,XG-1.*SIGII,XG+1.*SIGII,EPS)
      PXGH=PXG(TT)
      QXGH=QXG(TT)
      AI=ALPHA*MUE*(AEE-AIE +PXGH)
      BI=ALPHA*MUE*(AEI-AII +QXGH)
      SE=1./(1.+EXP(-NUEE*( AI-THETAE)))-1./(1.+EXP(NUEE*THETAE))
      SI=1./(1.+EXP(-NUEI*( BI-THETAI)))-1./(1.+EXP(NUEI*THETAI))
      DYYDTT(1)=1./MUE*(-YY(1)+(1.-RE*YY(1))*SE)
      DYYDTT(2)=1./MUE*(-YY(2)+(1.-RI*YY(2))*SI)
      RETURN
C
   20 DIFF1=YY(1)-EH1(IG)
      DIFF2=YY(2)-IH1(IG)
C
      STEPX=XH(3)-XH(2)
      SEI=0.
      SEE=0.
      DO   40   I=1,50
      AH=ABS(XG-XH(I))
      IF(AH.GT.SIGEI)   GO   TO   40
      EXTEI=BEI*EXP(-AH/SIGEI)
      IF(EH1(IG).NE.0.)   DIFFE=EH1(I)*DIFF1/EH1(IG)
      IF(EH1(IG).EQ.0.)   DIFFE=DIFF1
      SEI=SEI+DIFFE*STEPX*EXTEI
      IF(AH.GT.SIGEE)   GO   TO   40
      EXTEE=BEE*EXP(-AH/SIGEE)
      SEE=SEE+DIFFE*STEPX*EXTEE
   40 CONTINUE
      SEE=AEE+SEE
      SEI=AEI+SEI

      SIE=0.
      SII=0.
      DO   60   I=1,50
      AH=ABS(XG-XH(I))
      IF(AH.GT.SIGIE)   GO   TO   60
      EXTIE=BIE*EXP(-AH/SIGIE)
      IF(IH1(IG).NE.0.)   DIFFI=IH1(I)*DIFF2/IH1(IG)
      IF(IH1(IG).EQ.0.)   DIFFI=DIFF2
      SIE=SIE+DIFFI*STEPX*EXTIE
      IF(AH.GT.SIGII)   GO   TO   60
      EXTII=BII*EXP(-AH/SIGII)
      SII=SII+DIFFI*STEPX*EXTII
```

```
   60 CONTINUE
      DIE=AIE+SIE
      DII=AII+SII
C
      DBI=ALPHA*MUE*(DEI-DII+QXGH)
      DAI=ALPHA*MUE*(DEE-DIE+PXGH)
      SE=1./(1.+EXP(-NUEE*(DAI-THETAE)))-1./(1.+EXP(NUEE*THETAE))
      SI=1./(1.+EXP(-NUEI*(DBI-THETAI)))-1./(1.+EXP(NUEI*THETAI))
      DYYDTT(1)=1./MUE*(-YY(1)+(1.-RE*YY(1))*SE)
      DYYDTT(2)=1./MUE*(-YY(2)+(1.-RI*YY(2))*SI)
      RETURN
      END


      REAL FUNCTION PXG(TT)
      REAL IH1(50),IH2(50)
      REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
      DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
      COMMON XG,XH,EH1,IH1,IG,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
      COMMON RDE,RDI,TLE,TLI,LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
      IF(XG.LT.LE1)   GO   TO   20
      IF(XG.GT.LE2)   GO   TO   20
      IF(TT.GT.TLE)   GO   TO   20
      PXG =3.7
      RETURN
   20 PXG=.0
      RETURN
      END

      REAL FUNCTION QXG(TT)
      REAL IH1(50),IH2(50)
      REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
      DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
      COMMON XG,XH,EH1,IH1,IG,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
      COMMON RDE,RDI,TLE,TLI,LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
      QXG=.0
      RETURN
      END

      REAL FUNCTION FEE(X)
      REAL IH1(50),IH2(50)
      REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
      DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
      COMMON XG,XH,EH1,IH1,IG,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
      COMMON RDE,RDI,TLE,TLI,LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
      ALGOLEXTERNAL AITIPL
      XH1=XG-X
      BETAEE=BEE*EXP(-ABS(XH1)/SIGEE)
      EXTH=AITIPL(X,1,50,XH,EH1,2)
      FEE=RDE*EXTH*BETAEE
      RETURN
      END

      REAL FUNCTION FIE(X)
      REAL IH1(50),IH2(50)
      REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
      DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
      COMMON XG,XH,EH1,IH1,IG,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
      COMMON RDE,RDI,TLE,TLI,LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
      ALGOLEXTERNAL AITIPL
```

```
XH1=XG-X
BETAIE=BIE*EXP(-ABS(XH1)/SIGIE)
IXTH=AITIPL(X,1,50,XH,IH1,2)
FIE=ROI*IXTH*BETAIE
RETURN
END

REAL FUNCTION FEI(X)
REAL IH1(50),IH2(50)
REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
COMMON XG,XH,EH1,IH1,IG,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
COMMON ROE,ROI,TLE,TLI,LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
ALGOLEXTERNAL AITIPL
XH1=XG-X
BETAEI=BEI*EXP(-ABS(XH1)/SIGEI)
EXTH=AITIPL(X,1,50,XH,EH1,2)
FEI=ROE*EXTH*BETAEI
RETURN
END

REAL FUNCTION FII(X)
REAL IH1(50),IH2(50)
REAL LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,NUEI
DIMENSION Y(2),EH1(50),EH2(50),XH(50)
COMMON XG,XH,EH1,IH1,IG,BEE,SIGEE,BEI,SIGEI,BIE,SIGIE,BII,SIGII
COMMON ROE,ROI,TLE,TLI,LE1,LE2,LI1,LI2,MUE,NUEE,THETAE,NUEI,THETAI
ALGOLEXTERNAL AITIPL
XH1=XG-X
BETAII=BII*EXP(-ABS(XH1)/SIGII)
IXTH=AITIPL(X,1,50,XH,IH1,2)
FII=ROI*IXTH*BETAII
RETURN
END
```

```
C
C
C            PROGRAMM ZUR BESTIMMUNG DER SPRUNGREAKTIONSFUNKTION
C            ===================================================
C
C               DES WAHRSCHEINLICHKEITS-SUMMATIONS-MODELLES
C               ===========================================
C
C
      REAL L,LS,NPS,NEX
      DIMENSION YZO(18),SZYO(18),ZDY(18),SZY(18)
      EXTERNAL SFR,SFG
      COMMON XO,YO,SIG1,SIG2
C
C
      DATA L,DL/10.,3./
      DATA RX,RY,RZ/.2040461,.5734155,-.0381903/
      DATA GX,GY,GZ/-.1986855,.4319451,.0328297/
      DATA BX,BY,BZ/-.0053606,-.0053606,.0053606/
      DATA X,Y,XI,YI/.68861,.31121,.30300,.69690/
      DATA STEPX,STEPY/2.,2./
      EPS=.00001
C
C
      READ(5,10)   NPS,SIG1,SIG2
   10 FORMAT(3F5.2)
C
C
      LS=L+DL
      R=RX*X/Y+RY+RZ*1./Y
      G=GX*X/Y+GY+GZ*1./Y
      B=BX*X/Y+BY+BZ*1./Y
      RI=RX*XI/YI+RY+RZ*1./YI
      GI=GX*XI/YI+GY+GZ*1./YI
      BI=BX*XI/YI+BY+BZ*1./YI
      GR=R*L
      GG=G*L
      GB=B*L
      GRI=RI*DL
      GGI=GI*DL
      GBI=BI*DL
      RS=(GR+GRI)/LS
      GS=(GG+GGI)/LS
      BS=(GB+GBI)/LS
      P1=R+G+B
      P2=RS+GS+BS
      PSGU=-30.
      DO=3.*SIG2
      SIGU=DO
C
       READ(5,15)   PSSU,STEPX
   15  FORMAT(2F6.2)
C
      XO=0.
      YO=0.
C
      RQ=AINTEG(SFR,-SIGU,SIGU,EPS)
      GQ=AINTEG(SFG,-SIGU,SIGU,EPS)
C
      WRITE(6,60)   R,G,B,P1
```

```
      WRITE(6,60)    RS,GS,BS,P2
      WRITE(6,40)
      WRITE(6,30)    L,DL,SIG1,SIG2,NPS
      WRITE(6,20)
C
C
      DO   600   K=1,15
      XO=PSGU
      SYO=0.
      DO   500   I=1,31
        IF(XO.GE.YO+SIGU)   GO   TO   400
        IF(XO.LE.YO-SIGU)   GO   TO   300
      GU=XO-SIGU
      GF1=AINTEG(SFG,GU,YO,EPS)
      GF2=GQ-GF1
      RF1=AINTEG(SFR,GU,YO,EPS)
      RF2=RQ-RF1
      GX=GF1*G+GF2*GS
      RX=RF1*R+RF2*RS
C
      SH=(ABS(GX-RX))**NPS
C
      SYO=SYO+SH
C
      GO   TO   200
C
  300 GX=GQ*G
      RX=RQ*R
C
      SH=(ABS(GX-RX))**NPS
C
      SYO=SYO+SH
C
      GO   TO   200
C
  400 GX=GQ*GS
      RX=RQ*RS
C
      SH=(ABS(GX-RX))**NPS
C
      SYO=SYO+SH
C
C
  200 XO=XO+STEPX
C
  500 CONTINUE
C
      NEX=1./NPS
      SYO=SYO**NEX
      YZO(K)=YO
      SZYO(K)=SYO
      DIFF=0.
      IF(K.GT.1)    DIFF=SZYO(K)-SZYO(K-1)
       WRITE(9,25)    YO,SYO ,DIFF
      ZDY(K)=.0001
      YO=YO+STEPY
  600 CONTINUE
C
      LK=16
      DO   700   J=1,15
```

```
      SZY(J)=(SZYO(LK)-SZYO(1))/(SZYO(16)-SZYO(1))
       FZYO=SZY(J)
       XFZY=YZO(J)
      WRITE(6,15)   XFZY,FZYO
      LK=LK-1
  700 CONTINUE
C
   25 FORMAT(3F8.2)
   20 FORMAT(//2X,'   SDE     SOSE     DIFF   ', / )
   30 FORMAT(2X,5F13.2)
   40 FORMAT(//9X,'   L    ',5X,'   DL   ',5X,'   SIG1 ',5X,'   SIG2',/2X)
   50 FORMAT(///10X,'   I    ',5X,'   DO   ',5X,'   U2   ',/2X)
   60 FORMAT(10X,3F15.5,'  PR(BF I   ',F8.4)
   70 FORMAT(10X,I5,7X,F7.3,5X,F7.3,5F11.4)
C
C
C
C
C
      STOP
      END
C
C
C
      REAL FUNCTION SFR(T)
      COMMON XO,YO,SIG1,SIG2
      PI=3.141593
      A2=1./SIG2*EXP(-(T-XO)**2/(2.*SIG2**2))
      A=1./SQRT(2.*PI)*A2*100.
      SFR=A
      RETURN
      END
C
C
C
      REAL FUNCTION SFG(T)
      COMMON XO,YO,SIG1,SIG2
      PI=3.141593
      A1=1./SIG1*EXP(-(T-XO)**2/(2.*SIG1**2))
      A=1./SQRT(2.*PI)*A1*100.
      SFG=A
      RETURN
      END
```

Herrn Prof. Dr. R. Röhler danke ich an dieser Stelle besonders für sein nicht nachlassendes und förderndes Interesse an dem Entstehen dieser Arbeit. Besonders sei auch Herrn Dr. rer. nat. habil. I. Rentschler gedankt, durch den ich viele Anregungen während der Durchführung der Arbeiten erhielt. Auch den übrigen Mitarbeitern des Instituts für med. Optik, die mich mit Rat und Tat unterstützten, sei gedankt.

Die Durchführung der Arbeiten von April 1974 bis März 1976 wurde durch ein Promotionsstipendium des Cusanus-Werks personell gefördert. Ermöglicht wurde die Fertigstellung dieser Arbeit durch ein Grundstipendium, welches ich für mein Medizinstudium ebenfalls vom Cusanus-Werke erhalte.

Für die Auswertung der Daten und die theoretischen Modellbetrachtungen standen mir die Einrichtungen des Leibniz-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zur Verfügung.

LEBENSLAUF

Am 30. April 1947 wurde ich in Bad Reichenhall als Sohn des ehemaligen Berufssoldaten und Piloten und jetzigen kaufm. Angestellten Heinz Lorbeer und dessen Ehefrau Gisela, geb. Zoebe, geboren. In Bad Reichenhall-Karlstein besuchte ich von 1953 bis 1957 die Volksschule, danach das Karlsgymnasium in Bad Reichenhall, an welchem ich 1966 das Abitur ablegte. Nach dem 18 Monate dauernden Wehrdienst begann ich im SS 1968 an der Ludwig-Maximilians-Universität in München das Studium der Physik und Mathematik. Im April 1970 legte ich die Vordiplomprüfung, im Dezember 1973 die Diplomhauptprüfung ab. Die Diplomarbeit "Modellmäßige Beschreibung von Farbunterschiedsschwellen mit Hilfe der Fluktuationstheorie" fertigte ich am Institut für med. Optik unter Anleitung von Prof. Dr. R. Röhler an. Seit April 1974 arbeite ich am Institut für med. Optik an der vorliegenden Dissertation. Aus Interesse an naturwissenschaftlich-medizinischen Grenzproblemen begann ich im WS 74/75 mit dem Studium der Humanmedizin. Im April 1978 absolvierte ich den ersten Teil des "med. Staatsexamens."